



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
ESPECTRORADIOMETRO PARA DETERMINAR EL ESTRÉS VEGETAL
DE CULTIVOS DE PAPAS Y MAÍZ APLICADO A LA AGRICULTURA DE
PRECISIÓN"**

AUTORES:

CORREA BAUTISTA, EDISON ROBERTO

GUANOLUISA BETÚN, JHONY FERNANDO

DIRECTOR: ING. CÓRDOVA CRUZATTI, ANDREA CONCEPCIÓN

LATACUNGA

2019



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ESPECTRORADIOMETRO PARA DETERMINAR EL ESTRÉS VEGETAL DE CULTIVOS DE PAPAS Y MAÍZ APLICADO A LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN*: fue realizado por los señores *CORREA BAUTISTA, EDISON ROBERTO, GUANOLUISA BETÚN, JHONY FERNANDO* , el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 21 de enero del 2019

Andrea Córdova
.....

Ing. Andrea Concepción Córdova Cruzatty

C. C.:1803797222



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **CORREA BAUTISTA, EDISON ROBERTO, GUANOLUISA BETÚN, JHONY FERNANDO**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación, *diseño y construcción de un prototipo de espectroradiometro para determinar el estrés vegetal de cultivos de papas y maíz aplicado a la agricultura de precisión*, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 21 de enero del 2019

Firma:

Correa Bautista Edison Roberto

C.C.: 0503881674

Firma:

Gualuisa Betun Jhony Fernando

C.C.: 0603621640



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

*Nosotros, **CORREA BAUTISTA, EDISON ROBERTO, GUANOLUISA BETÚN, JHONY FERNANDO**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación **diseño y construcción de un prototipo de espectroradiometro para determinar el estrés vegetal de cultivos de papas y maíz aplicado a la agricultura de precisión**”, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.*

Latacunga, 21 de enero del 2019

Firma:

Correa Bautista Edison Roberto

C.C.: 0503881674

Firma:

Gualuisa Betun Jhony Fernando

C.C.: 0603621640

DEDICATORIA

Dedico este trabajo primero a dios por haberme dado la vida y fortaleza de seguir adelante, a mis padres Noé y Norma que fueron un pilar fundamental en mi vida apoyándome en cada etapa de mi vida, a mis abuelitos por su cariño y amor, a mis hermanos Marlon y Jorge que estuvieron apoyándome incondicionalmente dándome ánimos y consejos para seguir en la lucha a quienes admiro mucho.

A todas las personas que en el transcurso de la vida he conocido y me han brindado su apoyo.

EDISON ROBERTO CORREA BAUTISTA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo primero a dios por haberme dado la vida y fortaleza de seguir adelante, a mis padres Carmen y Raúl que fueron un pilar fundamental en mi vida apoyándome en cada etapa de mi vida, a mis hermanos que estuvieron apoyándome incondicionalmente dándome ánimos y consejos para seguir en la lucha a quienes admiro mucho.

A todas las personas que en el transcurso de la vida he conocido y me han brindado su apoyo.

GUANOLUISA BETUN JHONY FERNANDO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a dios que es mi guía en todo los pasos que doy en el camino de mi vida, a mis padres Noé y Norma que me apoyaron en cada situación difícil de mi vida, gracias a sus consejos y apoyo incondicional, a mis hermanos Jorge y Marlon, a mis tías y en especial a mi tía Verito que me apoyaron en cada etapa de mi vida, gracias por su amor y comprensión que me supieron dar en todo el camino transcurrido.

A Luz Cristina que estuvo apoyándome en las buenas y en los malos momentos de mi vida, a mi compañero de tesis, por todo el esfuerzo y sacrificios que superamos en esta etapa de la vida, a mis amigos de la Ing. Automotriz y Ing. Mecatrónica por brindarme su amistad incondicional.

A nuestra tutora de tesis Ing. Andrea Córdova gracias a sus enseñanzas y la confianza depositada en nosotros que nos brindó en este tema.

Un agradecimiento especial al Dr. Vicente Córdova, Dr. Eduardo Avalos, Ing. por el apoyo brindado y colaboración con nuestro tema de tesis.

A todas las personas que creyeron en mí y permanecieron apoyando en toda esta etapa muchas gracias a cada una de ellas que compartimos malos y buenos momentos.

EDISON ROBERTO CORREA BAUTISTA

AGRADECIMIENTO

Agradezco a dios que es mi guía en todo los pasos que doy en el camino de mi vida, a mis padres Raúl y Carmen que me apoyaron en cada situación difícil de mi vida, gracias a sus consejos y apoyo incondicional, a mis hermanos Cristian, Héctor, Gabriela, Fernanda, a mi tía Beatriz que me apoyaron en cada etapa de mi vida, gracias por su amor y comprensión que me supieron dar en todo el camino transcurrido.

A Estefanía por su amor, cariño y comprensión en momentos buenos y malos de mi vida, a mi compañero de tesis, por todo el esfuerzo y sacrificios que superamos en esta etapa de la vida.

A nuestra tutora de tesis Ing. Andrea Cordada gracias a sus enseñanzas y la confianza depositada en nosotros que nos brindó en este tema.

Un agradecimiento especial al Dr. Vicente cordada, Dr. Eduardo Avalos, Ing. por el apoyo brindado y colaboración con nuestro tema de tesis.

A todas las personas que creyeron en mí y permanecieron apoyando en toda esta etapa muchas gracias a cada una de ellas que compartimos malos y buenos momentos.

GUANOLUISA BETÚN JONNY FERNANDO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|------------|
| CERTIFICACIÓN | i |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD | ii |
| AUTORIZACIÓN | iii |
| DEDICATORIA | v |
| AGRADECIMIENTO | vi |
| AGRADECIMIENTO | vii |
| CAPÍTULO 1 | |
| PROBLEMA | 1 |
| 1.1. Planteamiento del problema | 1 |
| 1.2. Antecedentes | 2 |
| 1.3. Justificación e importancia | 3 |
| 1.4. Objetivos | 4 |
| 1.4.1. Objetivo general | 4 |
| 1.4.2. Objetivos específicos..... | 4 |
| 1.5. Hipótesis..... | 4 |
| 1.6. Variables de la investigación | 4 |

CAPÍTULO 2

| | |
|---|----------|
| MARCO TEÓRICO | 5 |
| 2.1. El espectro electromagnético | 5 |
| 2.2. Características | 5 |
| 2.3. Unidades de medida de radiación electromagnética | 6 |
| 2.4. Rango del espectro | 7 |
| 2.5. Comportamiento espectral de la vegetación | 9 |
| 2.6. Radiómetro..... | 12 |
| 2.7. Espectrómetro..... | 13 |
| 2.8. Espectroradiómetro..... | 15 |
| 2.9. Aplicaciones del espectroradiómetro | 16 |
| 2.9.1. Espectrómetros para la medición led | 16 |
| 2.9.2. Sistemas de análisis espectral solar..... | 16 |
| 2.9.3. Predicción de la madurez de los aguacates con infrarrojo cercano. | 17 |
| 2.10. Análisis de la ternura de la carne | 19 |
| 2.11. Investigación de suelos | 19 |
| 2.12. Agricultura de Precisión | 21 |
| 2.13. Índices de vegetación..... | 22 |
| 2.13.1. Comportamiento espectral de la hoja viva..... | 24 |

| | |
|---|----|
| 2.13.2. Propiedades ópticas de las hojas | 25 |
| 2.13.3. Los Índices Basados en la Pendiente | 25 |
| 2.14. Equipos existentes en el mercado | 29 |
| 2.14.1. Espectroradiómetro PS200 | 29 |
| 2.14.2. Espectroradiómetro (SS-110)..... | 31 |
| 2.14.3. Espectroradiómetro RS 3500 | 32 |
| 2.15. Punta de tomas de muestra existente en el mercado | 33 |
| 2.15.1. Clip de Hoja..... | 33 |
| 2.15.2. Pistola grip..... | 34 |

CAPÍTULO 3

| | |
|--|-----------|
| DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES | 36 |
| 3.1. Selección del sensor del prototipo | 37 |
| 3.2. Selección del cable de fibra óptica..... | 44 |
| 3.3. Selección del procesador..... | 47 |
| 3.4. Selección de la comunicación | 49 |
| 3.5. Selección de Software para la comunicación de datos. | 49 |
| 3.6. Selección del Software para el desarrollo de la interfaz..... | 50 |
| 3.7. Fuente de luz artificial | 51 |
| 3.8. Selección de la fuente de energía..... | 54 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.9. | Punta de muestra | 59 |
| 3.9.1. | Diseño estructural de la punta de muestra | 59 |
| 3.9.2. | Selección del material de diseño para la punta de muestreo | 61 |
| 3.9.3. | Diseño de la punta de muestra..... | 64 |
| 3.9.4. | Funcionamiento de la punta de muestra | 73 |
| 3.9.5. | Diseño de la estructura del prototipo | 75 |

CAPÍTULO 4

| | | |
|--------|--|-----------|
| | IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA LA ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS DEL PROTOTIPO..... | 78 |
| 4.1. | Implementación del sistema eléctrico | 79 |
| 4.1.1. | Diagrama eléctrico del Procesador | 79 |
| 4.1.2. | Diagrama eléctrico del sistema de luz artificial..... | 80 |
| 4.2. | Dependencia para el desarrollo del programa | 81 |
| 4.3. | Comprobación de drives en Linux..... | 82 |
| 4.4. | Comprobación del espectrómetro | 83 |
| 4.5. | Diseño de la interfaz | 84 |
| 4.5.1. | Configuración de la Raspberry Pi 3..... | 84 |
| 4.5.2. | Código del servicio de bluetooth | 87 |
| 4.6. | Implementación de la interfaz | 89 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.7. | Implementación del sistema de iluminación..... | 94 |
| 4.7.1 | Cargador de la batería..... | 95 |
| 4.7.2 | Batería..... | 96 |
| 4.7.3 | Luz led..... | 97 |
| 4.8. | Implementación del espectroradiómetro | 98 |
| 4.9. | Implementación de la punta de prueba | 100 |
| 4.9.1. | Carcasa izquierda | 101 |
| 4.9.2. | Carcasa derecha | 102 |
| 4.9.3. | Acoples del sistema artificial | 102 |
| 4.9.4. | Sistema de luz solar | 103 |

CAPÍTULO 5

PRUEBAS Y RESULTADOS..... 104

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.1. | Validación del sistema de interfaz desarrollado. | 104 |
| 5.1.1 | Verificación mediante el Laser 532 nm..... | 105 |
| 5.2. | Validación mediante el Fieldspec 4 Del Instituto Especial Ecuatoriano | 109 |
| 5.3. | Validación de pruebas en cultivos de maíz y papas..... | 113 |

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 120

| | | |
|------|-------------------|-----|
| 6.1. | Conclusiones..... | 120 |
|------|-------------------|-----|

| | |
|----------------------------|------------|
| 6.2. Recomendaciones | 122 |
| BIBLIOGRAFÍA | 123 |
| ANEXOS | 125 |
| CERTIFICACIÓN | 126 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1 <i>Región del espectro</i> | 6 |
| Tabla 2 <i>Especificación del sensor espectral</i> | 41 |
| Tabla 3 <i>Especificación de la fibra óptica</i> | 45 |
| Tabla 4 <i>Especificación del procesador</i> | 47 |
| Tabla 5 <i>Especificaciones de la tarjeta Raspberry PI 3</i> | 48 |
| Tabla 6 <i>Selección de comunicación</i> | 49 |
| Tabla 7 <i>Selección del software</i> | 50 |
| Tabla 8 <i>Características de la fuente de luz artificial</i> | 54 |
| Tabla 9 <i>Selección de la fuente de energía</i> | 57 |
| Tabla 10 <i>Criterio de selección del material para la punta de muestreo</i> | 61 |
| Tabla 11 <i>Características del PLA o poliácido láctico</i> | 62 |
| Tabla 12 <i>Tabla de datos de PRI de las muestras en plantas de maíz</i> | 114 |
| Tabla 13 <i>Tabla de datos del PRI de las muestras en plantas de papas</i> | 116 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-------------------|--|----|
| Figura 1. | <i>División del espectro electromagnético</i> | 8 |
| Figura 2. | <i>Comportamiento Espectral</i> | 10 |
| Figura 3. | <i>Firmas espectrales típicas para vegetación, suelo en el rango visible</i> ... | 12 |
| Figura 4. | <i>Radiómetro de Crookes</i> | 13 |
| Figura 5. | <i>Espectrómetro</i> | 14 |
| Figura 6. | <i>Espectroradiómetro</i> | 15 |
| Figura 7. | <i>Espectroradiómetro para calibración de led</i> | 16 |
| Figura 8. | <i>Análisis spectral solar</i> | 17 |
| Figura 9. | <i>Sistema con el campo 3D de la fijación vista de reflectancia.</i> | 18 |
| Figura 10. | <i>Espectros de aguacates escaneados con StellarCASE-NIRS.</i> | 18 |
| Figura 11. | <i>Espectroradiómetro ideal para estudios de suelos</i> | 21 |
| Figura 12. | <i>Espectros de reflectividad típicos de la vegetación y el suelo</i> | 23 |
| Figura 13. | <i>Espectroradiómetro PS200</i> | 30 |
| Figura 14. | <i>Espectroradiómetro PS200</i> | 30 |
| Figura 15. | <i>Espectroradiómetro (SS-110)</i> | 31 |
| Figura 16. | <i>Espectroradiómetro (SS-110)</i> | 32 |
| Figura 17. | <i>Espectroradiómetro RS 3500</i> | 32 |
| Figura 18. | <i>Espectroradiómetro RS 3500</i> | 33 |
| Figura 19. | <i>Clip de hoja</i> | 34 |
| Figura 20. | <i>Pistola grip</i> | 35 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| Figura 21. | <i>Modulo del sistema.....</i> | 36 |
| Figura 22. | <i>Índice de reflectancia fotoquímica</i> | 37 |
| Figura 23. | <i>Espectrómetro de onda negra.....</i> | 38 |
| Figura 24. | <i>Espectrómetro de onda azul.....</i> | 39 |
| Figura 25. | <i>Espectrómetro de onda verde.....</i> | 40 |
| Figura 26. | <i>Estructura interna del detector</i> | 42 |
| Figura 27. | <i>Curva de atenuación típica para el cable de fibra óptica F600-VISNIR.....</i> | 45 |
| Figura 28. | <i>Curva de atenuación típica para el cable de fibra óptica F600-UVVIS..</i> | 46 |
| Figura 29. | <i>F600-Y-UVSRNIR</i> | 46 |
| Figura 30. | <i>Características de una tarjeta Raspberry Pi 3.....</i> | 48 |
| Figura 31. | <i>Longitud de onda de tipo de luz en muestra de espectro de colores.....</i> | 52 |
| Figura 32. | <i>Batería lipo 3,7 V.....</i> | 58 |
| Figura 33. | <i>Presión ejercida por un hombre.....</i> | 60 |
| Figura 34. | <i>Presión ejercida por una mujer.....</i> | 60 |
| Figura 35. | <i>Construcción de la cavidad cónica de la punta de muestra.....</i> | 63 |
| Figura 36. | <i>Punta de muestra</i> | 65 |
| Figura 37. | <i>Carcasa derecha</i> | 66 |
| Figura 38. | <i>Análisis de esfuerzos de la carcasa derecha</i> | 67 |
| Figura 39. | <i>Carcasa izquierda.....</i> | 68 |
| Figura 40. | <i>Mecanismo de la punta de muestra.....</i> | 69 |
| Figura 41. | <i>Análisis de esfuerzo del riel del mecanismo</i> | 69 |
| Figura 42. | <i>Análisis de esfuerzo del tornillo de sujeción</i> | 70 |
| Figura 43. | <i>Análisis de esfuerzos del gatillo.....</i> | 71 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| Figura 44. | <i>Acople calibración artificial</i> | 72 |
| Figura 45. | <i>Acople</i> | 72 |
| Figura 46. | <i>Acople de luz</i> | 73 |
| Figura 47. | <i>Puntas de prueba para luz solar</i> | 74 |
| Figura 48. | <i>Punta de prueba para luz artificial</i> | 75 |
| Figura 49. | <i>Carcasa del prototipo</i> | 76 |
| Figura 50. | <i>Análisis de esfuerzo de la caja del prototipo</i> | 76 |
| Figura 51. | <i>Vista trasera de la estructura del ensamblado final</i> | 77 |
| Figura 52. | <i>Vista lateral del ensamble final</i> | 77 |
| Figura 53. | <i>Modulo del sistema eléctrico del equipo</i> | 78 |
| Figura 54. | <i>Diagrama de conexión del procesador</i> | 80 |
| Figura 55. | <i>Comando de instalación</i> | 81 |
| Figura 56. | <i>Instalación de librerías Pyusb</i> | 82 |
| Figura 57. | <i>Comando de instalación de librerías libusb</i> | 82 |
| Figura 58. | <i>Comprobación de equipo conectado</i> | 82 |
| Figura 59. | <i>Comprobación del sensor</i> | 83 |
| Figura 60. | <i>Actualización de paquetes</i> | 84 |
| Figura 61. | <i>Instalación de paquete de bluetooth</i> | 85 |
| Figura 62. | <i>Instalación Pybluez</i> | 85 |
| Figura 63. | <i>Configuración del bluetooth</i> | 85 |
| Figura 64. | <i>Comprobación de inflaciones de paquetes</i> | 86 |
| Figura 65. | <i>Comando de reinicio del bluetooth</i> | 86 |
| Figura 66. | <i>Registro del puerto serial</i> | 87 |

| | | |
|-------------------|---|-----|
| Figura 67. | <i>Vinculación de puertos bluetooth.....</i> | 87 |
| Figura 68. | <i>Comunicación del servidor con la aplicación androide.....</i> | 87 |
| Figura 69. | <i>Códigos de comunicación</i> | 88 |
| Figura 70. | <i>Pantalla de selección del modo de trabajo.....</i> | 90 |
| Figura 71. | <i>Pantalla de calibración de reflectancia luz al 100%.....</i> | 91 |
| Figura72. | <i>Pantalla para visualizar la reflectancia vs longitud de onda</i> | 92 |
| Figura 73. | <i>Pantalla de la historia de la aplicación.....</i> | 93 |
| Figura 74. | <i>Firmas espectrales del prototipo.....</i> | 94 |
| Figura 75. | <i>Implantacion del sistema</i> | 95 |
| Figura 76. | <i>Módulo de carga.....</i> | 96 |
| Figura 77. | <i>Batería de li- Po 500 mAH a 3.7 v</i> | 97 |
| Figura 78. | <i>Luz led.....</i> | 98 |
| Figura 79. | <i>Carcasa del sistema</i> | 98 |
| Figura 80. | <i>Carcasa del sistema.....</i> | 99 |
| Figura 81. | <i>Compartimento dos del sistema</i> | 99 |
| Figura 82. | <i>Tercer compartimiento.....</i> | 100 |
| Figura 83. | <i>Mecanismo de toma de datos.....</i> | 101 |
| Figura 84. | <i>Carcasa izquierda.....</i> | 101 |
| Figura 85. | <i>Cierre de la punta de muestra</i> | 102 |
| Figura 86. | <i>Cierre de la punta de muestra</i> | 103 |
| Figura 87. | <i>Sistema de luz solar</i> | 103 |
| Figura 88. | <i>Laser 532 nm Óptica Bank de la Escuela Politécnica Nacional.</i> | 105 |
| Figura 89. | <i>Prueba de validación del prototipo con el láser 532 nm en la EPN....</i> | 106 |

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Figura 90. | <i>Muestra tomada del láser 532 nm con el software del stellarnet.....</i> | 107 |
| Figura 91. | <i>Muestra tomada del láser 532 nm mediante la interfaz desarrollada ..</i> | 108 |
| Figura 92. | <i>Calibración en blanco con luz de tungsteno del equipo Fieldspec 4 ..</i> | 109 |
| Figura 93. | <i>Muestra tomada con Fieldspec 4 del Instituto Espacial Ecuatoriano...</i> | 110 |
| Figura 94. | <i>Calibración en blanco con la luz de tungsteno del prototipo.....</i> | 111 |
| Figura 95. | <i>Muestra tomada mediante la interfaz del prototipo desarrollado.</i> | 112 |
| Figura 96. | <i>Diagrama de valores de PRI en luz natural en plantas de Maíz.</i> | 115 |
| Figura 97. | <i>Diagrama de valores de PRI en luz artificial en plantas de Maíz.....</i> | 116 |
| Figura 98. | <i>Diagrama de valores de PRI en luz natural en plantas de papas.....</i> | 118 |
| Figura 99. | <i>Diagrama de valores de PRI en luz artificial en plantas de papas.....</i> | 119 |

RESUMEN

La agricultura de precisión en las últimas décadas ha visto notables avances técnicos que han permitido un mejor manejo de las explotaciones agrícolas, optimizando recursos e insumos aplicados. En el ámbito de la geomática, los sensores ópticos terrestres han permitido profundizar y ampliar el conocimiento del comportamiento espectral de los cultivos en estudio, con beneficios cada vez mayores en aplicación de tratamientos y prevención de enfermedades y/o plagas. El objetivo de este trabajo fue caracterizar los cultivos de papas y maíz en el cantón salcedo por medio de espectro-radiometría de campo, en plantas sanas y enfermas. El estudio se efectuó en una parcela de cultivos, ubicadas en el cantón salcedo, Ecuador. Se utilizó un sensor terrestre espectral con un rango de longitud de onda abarcado de 350 a 1100 nanómetros (espectro visible e infrarrojo cercano). Además se realizará pruebas de funcionamiento del prototipo con luz natural y luz controlada con la finalidad que el equipo tenga mejor confiabilidad en la determinación del índice de vegetación PRI en un cultivo de maíz y papas.

PALABRAS CLAVE:

- **ESPECTRORADIÓMETRO**
- **AGRICULTURA DE PRECISIÓN**
- **CULTIVOS DE PAPA**
- **CULTIVOS DE MAÍZ**
- **ONDAS ELETROMAGNETICAS**

ABSTRACT

The agriculture of precision in the last decades has seen remarkable technical advances that have allowed a better handle of the agricultural exploitations, optimizing resources and applied insumos. In the field of geomatics, terrestrial optical sensors have allowed to deepen and expand the knowledge of the spectral behavior of the crops under study, with increasing benefits in the application of treatments and prevention of diseases and / or pests. The objective of this work was to characterize potato and corn crops in the canton of Salcedo by means of field radiometry, in healthy and diseased plants. The study was carried out in a plot of crops, located in the canton of Salcedo, Ecuador. A spectral terrestrial sensor with a wavelength range of 350 to 1100 nanometers (visible and near infrared) was used. In addition, tests of the prototype operation will be carried out with natural light and controlled light in order for the team to have better reliability in determining the PRI vegetative index in a corn and potato crop.

KEYWORDS:

- **SPECTRORADIOMETER**
- **PRESTIGE AGRICULTURE**
- **CROPS OF POPE**
- **CORN CROPS**
- **ELETROMAGNETIC WAVES**

CAPÍTULO 1

PROBLEMA

1.1.Planteamiento del problema

Actualmente los mercados internaciones son cada vez más competitivos ya que requieren alimentos con altos estándares de calidad, razón por la cual los agricultores han optado por la agricultura de precisión ya que este procedimiento permite ahorrar un 30% el costo de la producción a más de obtener información detallada del estado de los cultivos.

No obstante en Ecuador la falta de información y tecnología se han considerado un limitante en el desarrollo de diversas áreas productivas que necesitan ser tecnificadas para obtener resultados favorables en cuanto a la identificación de problemas como plagas, falta de fertilización y de agua lo que impide mejorar la producción de alimentos.

Siendo así necesario diseñar un prototipo que permita medir ondas espectrales y de reflectancia en un rango determinado del espectro electromagnético además de obtener un índice de Reflectancia Fotoquímica (PRI), este índice permitirá adquirir información valiosa sobre el estrés de la planta.

Sin embargo estos instrumentos tienen un alto costo en el mercado, ya que es difícil acceder a este tipo de tecnología en cuanto al sensoriamiento remoto aplicado a la agricultura de precisión. A la vez la poca información sobre este tipo de instrumentos y la dependencia tecnológica son parámetros que evitan el desarrollo de nuevas tecnologías

aplicables a casos de estudio locales que se enfocan en el beneficio de los pequeños y grandes agricultores.

1.2. Antecedentes

Gran parte de los esfuerzos en la agricultura de precisión se encuentran enfocados a desarrollar métodos no destructivos o poco invasivos en especies vegetales para la obtención de información de estados vegetales, estos equipos son viables para el desarrollo técnico de la agricultura de precisión, beneficiando así al agricultor en un manejo óptimo de recursos y en la disminución de enfermedades en sus plantaciones, reduciendo pérdidas a más de obtener productos de mejor calidad.

Uno de los métodos utilizados es la espectroscopia son los sensores de medición de longitudes de ondas espectrales, los cuales proporcionan índices de vegetación que reflejan diferentes características sobre la salud de los cultivos.

La Reflectancia Fotoquímica (PRI) es un índice de vegetación indicador del proceso de fotosíntesis, este determina la falta de agua en cultivos que genera estrés vegetal en las plantas.

Un espectroradiómetro es un equipo que permite medir la radiación de luz entrante, así como la reflectancia y la transmitancia en un rango espectral, permitiendo así obtener la intensidad cuantitativa o absoluta en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, sin entrar en contacto con la planta.

Este equipo ayudará en la búsqueda de soluciones para obtener una tecnificación más adecuada en la agricultura de precisión, lo que permitirá realizar lecturas a mayor alcance y precisión de ondas espectrales y de reflectancia.

Teniendo en cuenta que existe diversos productos que miden longitudes de ondas electromagnéticas que son utilizados para el control de equipos en fototerapia que proporciona una mediada cuantitativa de la intensidad electromagnética en las maquinas, como también puede ser utilizado para medir la potencia optima en rangos de longitudes de onda.

1.3. Justificación e importancia

El presente proyecto está enfocado a la creación de un prototipo de espectroradiómetro que ayudará al agricultor en el cuidado de sus cultivos contribuyendo así con el avance tecnológico de la agricultura de precisión en el país. Por otra parte debido a la falta de recursos o información para realizar un correcto diagnóstico vegetal se presentará esta alternativa, a fin de medir el índice de Reflectancia Fotoquímica (PRI) el cual determinará el estrés vegetal y condescenderá mejorar la mejora de calidad y productividad de los productos agrícolas.

A demás El diseño de este prototipo ayudará a obtener una base de información técnica sobre ondas espectrales, lo cual permitirá la comprensión de fenómenos que no son visibles al ojo humano, así se desarrolla nuevas tecnologías locales que buscan el adecuado tratamiento de cultivos en beneficio del agricultor.

El mantenimiento de este prototipo será accesible y económico para los agricultores que busca la tecnificación de la agricultura de precisión en el medio local.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un prototipo de espectroradiómetro para determinar el estrés vegetal en cultivos de papas y maíz.

1.4.2. Objetivos específicos

- Investigar sobre espectroradiómetro y sus diferentes tipos de aplicaciones.
- Construir localmente un sistema de sensoriamiento remoto en el espectro PRI.
- Desarrollar un algoritmo para el procesamiento de señales de índice de vegetación.
- Comprobar el funcionamiento del equipo en una plantación.
- Obtener información técnica de estrés vegetal con luz natural y artificial.
- Implementar una aplicación para mostrar la información de estrés vegetal

1.5. Hipótesis

¿El diseño de un prototipo espectroradiómetro permitirá la determinación del estrés vegetal en cultivos locales?

1.6. Variables de la investigación

Variables Independientes

Equipo espectroradiómetro.

Variables Dependientes

Niveles de ondas espectrales para determinar estrés vegetal.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. El espectro electromagnético

Al flujo saliente de energía de una fuente en forma de ondas electromagnéticas se le denomina radiación electromagnética, esta radiación puede ser de origen natural o artificial. El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias (número de ciclos de la onda por unidad de tiempo) posibles a las que se produce radiación electromagnética.

2.2. Características

Las ondas electromagnéticas son todas semejantes (independientemente de cómo se generen) y sólo se diferencian en su longitud de onda y frecuencia. La luz es una onda electromagnética.

Las radiaciones electromagnéticas se propagan en el vacío a la velocidad de la luz.

Las ondas electromagnéticas cubren una amplia gama de frecuencias o de longitudes de ondas y pueden clasificarse según su principal fuente de producción, la clasificación no tiene límites precisos.

Tabla 1*Región del espectro*

| Región del espectro | Intervalo de frecuencias (Hz) |
|----------------------------|--------------------------------------|
| Radio-microondas | $0 - 3e^{12}$ |
| Infrarrojo | $3e^{12} - 4.6e^{14}$ |
| Luz visible | $4.6e^{14} - 7.5e^{14}$ |
| Ultravioleta | $7.5e^{14} - 6e^{16}$ |
| Rayos X | $6e^{16} - 1e^{20}$ |
| Radiación gamma | $1e^{20} - \dots$ |

2.3. Unidades de medida de radiación electromagnética

Energía radiante (Q) es la energía transportada por una onda electromagnética. Es una medida de la capacidad de la onda para realizar un trabajo, moviendo un objeto, calentándolo o cambiando su estado. Se mide en Julios. La cantidad de energía por unidad de volumen se llama densidad de energía radiante, se mide en Julios/m³.

$$W = \frac{dQ}{dV} \quad (1)$$

Se llama flujo radiante a la cantidad de energía radiada por unidad de tiempo, se mide en watts (W).

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2)$$

Densidad de flujo radiante es el flujo radiante interceptado por la unidad de área de una superficie plana. Se mide en W/m². Si el flujo es entrante hacia la superficie, la densidad de flujo radiante se llama Irradiación (E), si es saliente Excitancia o Emitancia radiante (M).

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad (3)$$

Intensidad radiante es el flujo radiante, desde una fuente puntual, por unidad de ángulo sólido, que sale de la fuente en la dirección considerada. Se mide en Watts/estereorradián

$$I = \frac{d\phi}{dW} \quad (4)$$

2.4. Rango del espectro

El espectro cubre la energía de ondas electromagnéticas que tienen longitudes de onda diferentes. Las frecuencias de 30 Hz y más bajas pueden ser producidas por ciertas nebulosas estelares y son importantes para su estudio. Se han descubierto frecuencias tan altas como $2.9 \cdot 10^{27}$ Hz.

La energía electromagnética en una longitud de onda particular λ (en el vacío) tiene una frecuencia asociada f y una energía fotónica E . Así, el espectro electromagnético puede expresarse en términos de cualquiera de estas tres variables, que están relacionadas mediante ecuaciones. De este modo, las ondas electromagnéticas de alta frecuencia tienen una longitud de onda corta y energía alta; las ondas de frecuencia baja tienen una longitud de onda larga y energía baja.

Siempre que las ondas de luz (y otras ondas electromagnéticas) se encuentran en un medio (materia), su longitud de onda se reduce. Las longitudes de onda de la radiación electromagnética, sin importar el medio por el que viajen, son, por lo general, citadas en

términos de longitud de onda en el vacío, aunque no siempre se declara explícitamente.

(Garis, 2010)

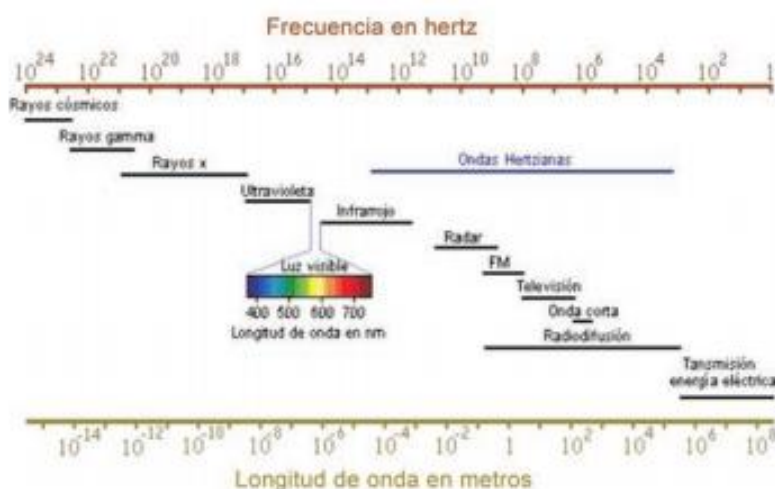


Figura 1. División del espectro electromagnético

Generalmente, la radiación electromagnética se clasifica por la longitud de onda: ondas de radio, microondas, infrarroja y región visible, que percibimos como luz, rayos ultravioletas, rayos X y rayos gamma.

El comportamiento de la radiación electromagnética depende de su longitud de onda. Las frecuencias más altas tienen longitudes de onda más cortas, y las frecuencias inferiores tienen longitudes de onda más largas. Cuando la radiación electromagnética interacciona con átomos y moléculas, su comportamiento también depende de la cantidad de energía por cuanto que transporta.

La espectroscopia puede descubrir una región mucho más amplia del espectro que el rango visible de 400 nm a 700 nm. Un espectroscopio de laboratorio común puede descubrir longitudes de onda desde 2 nm a 2500 nm. Con este tipo de aparatos puede

obtenerse información detallada sobre las propiedades físicas de objetos, gases o incluso estrellas. La espectrometría se usa sobre todo en astrofísica. Por ejemplo, muchos átomos de hidrógeno emiten ondas de radio que tienen una longitud de onda de 21.12 cm. (Guillermo, 2017)

2.5. COMPORTAMIENTO ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN

La cubierta vegetal es un medio heterogéneo compuesto de hojas, tallos, troncos, suelos, agua elementos todos ellos que presentan sus respuestas espectrales respectivas. Además, hay que tener en consideración que las plantas son seres vivos sujetos a cambios estacionales, climáticos e incluso a enfermedades y que estos cambios afectan a su reflectividad. Por estas razones el estudio del comportamiento espectral de la vegetación es muy complejo.

La **vegetación sana** tiene una reflectividad baja en el rango visible (400-700) nm, aunque con un pico en el color verde debido a la clorofila. La reflectividad de la vegetación es muy alta en el infrarrojo próximo debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda. En el infrarrojo medio hay una disminución especialmente importante en aquellas longitudes de onda en las que el agua de la planta absorbe la energía.

La **vegetación enferma** presenta una disminución de la reflectividad en las bandas infrarrojas y un incremento en el rojo y azul.

Se observa también que la reflectancia de una planta depende de su contenido en agua.

Cuando el contenido de agua aumenta, disminuye la reflectancia ya que aumenta la absorción de radiación por parte del agua contenida en la planta.

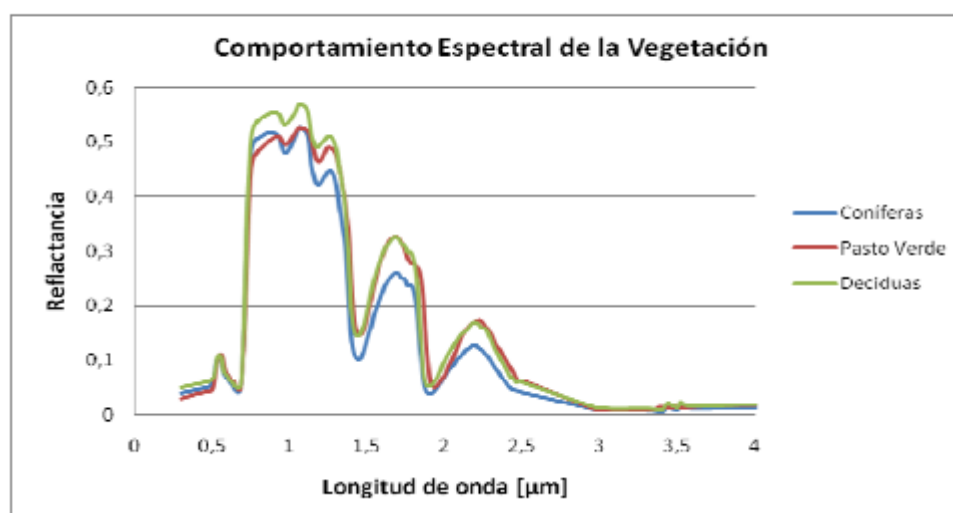


Figura 2 *Comportamiento Espectral*

- La vegetación tiene un comportamiento dinámico debido a los cambios fenológicos que ocurren estacionalmente. Esto significa que su firma espectral cambia durante el año.
- Las condiciones de iluminación asociadas a la topografía (pendiente y orientación), la posición del sol durante el año (elevación y azimut), y las condiciones de humedad del suelo y la vegetación pueden significar variaciones importantes en el patrón de respuesta espectral.

- Debido a la resolución espacial de la mayoría de los sensores, la información contenida en un píxel es el resultado de una mezcla espectral de varios tipos de materiales. Por ejemplo, en el caso de Landsat TM / ETM+ el área asociada a un único píxel (30 x 30 m) puede estar compuesta por vegetación herbácea, vegetación arbórea, suelo desnudo y pavimento, todo lo cual queda registrado en un único nivel digital.

La firma espectral se define como el comportamiento diferencial que presenta la radiación reflejada (reflectancia) o emitida (Emitancia) desde algún tipo de superficie u objeto terrestre en los distintos rangos del espectro electromagnético. Una forma gráfica de estudiar este comportamiento es disponer los datos de reflectancia (%) en el eje Y, la longitud de onda λ en el eje X. Al unir los puntos con una línea continua se origina una representación bidimensional de la firma espectral.

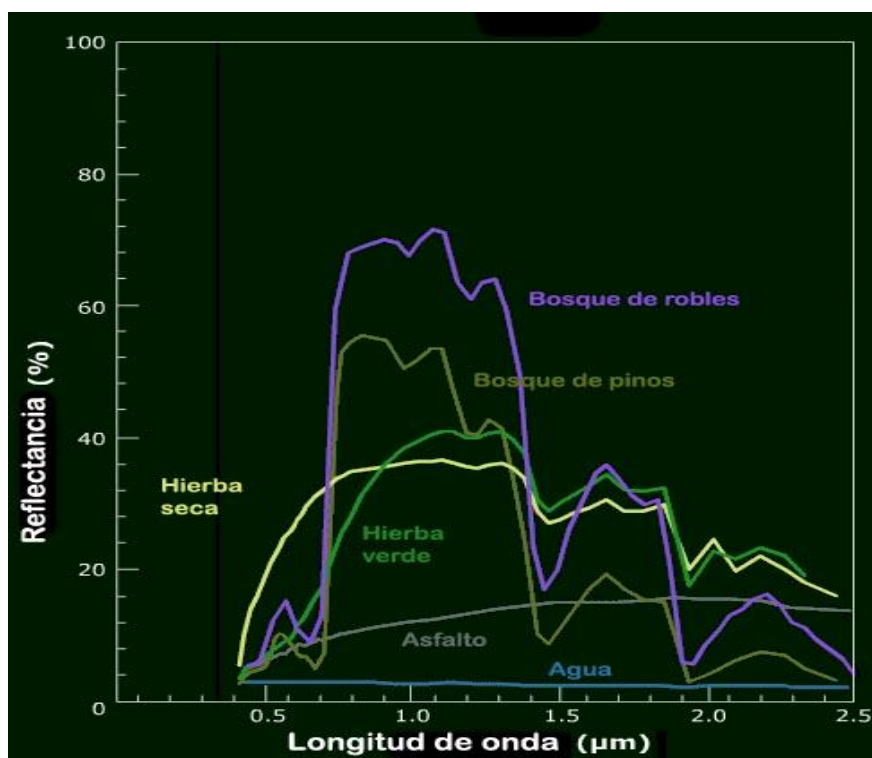


Figura 3 Firmas espectrales típicas para vegetación, suelo y agua en el rango visible

2.6. Radiómetro

Es un dispositivo inventado en 1873 por el químico inglés William Crookes. Consiste en cuatro brazos que sostienen cada uno un álabe o placa en sus extremos, pintados de blanco de un lado y de negro del otro. Los cuatro brazos que soportan las placas están suspendidos en una aguja y sostenidos por un eje de vidrio para disminuir en lo posible la fricción. Este molinito se encuentra dentro de una esfera de vidrio sellada y en la que se ha realizado un vacío parcial. Los álabes rotan al ser expuestos a luz, siendo más rápido el giro cuanto más intensa es la luz incidente. Eso proporciona una medida cuantitativa de la intensidad de la radiación electromagnética. (Mendoza Rodriguez, 2014)



Figura 4 *Radiómetro de Crookes*

Fuente: (Mendoza Rodriguez, 2014)

2.7. Espectrómetro

El espectrómetro, espectrofotómetro o espectrógrafo, es un aparato capaz de analizar el espectro de frecuencias característico de un movimiento ondulatorio. Se aplica a diferentes instrumentos que operan sobre un amplio campo de longitudes de onda.

Un espectrómetro óptico o espectroscopio, es un instrumento que sirve para medir las propiedades de la luz en una determinada porción del espectro electromagnético. La variable que se mide generalmente es la intensidad luminosa, pero se puede medir también, por ejemplo, el estado de polarización electromagnética. La variable independiente suele ser la longitud de onda de la luz, generalmente expresada en submúltiplos del metro, aunque algunas veces pueda ser expresada en cualquier unidad

directamente proporcional a la energía del fotón, como la frecuencia o el electrón-voltio que mantienen una relación inversa con la longitud de onda.

Se utilizan espectrómetros en espectroscopia para producir líneas espectrales y medir sus longitudes de onda e intensidades.(Espectrómetro, 2017)

En general, debido a las diferentes técnicas necesarias para medir distintas porciones del espectro, un instrumento concreto sólo operará sobre una pequeña porción de este campo total. El analizador de espectro es un dispositivo electrónico muy parecido por debajo de las frecuencias ópticas (es decir, microondas y radiofrecuencia).



Figura 5 *Espectrómetro*

Fuente: (Espectrómetro, 2017)

Si hacemos la comparación entre radiómetros y espectrómetros, vemos como los radiómetros son instrumentos más económicos, portátiles y diseñados para mediciones rápidas, mientras que los espectrómetros son equipos más centrados en proporcionar resultados precisos, fijos y versátiles. Así, los espectroradiómetro saben combinar perfectamente la precisión y portabilidad necesaria para ampliar el abanico de aplicaciones.

2.8. Espectroradiómetro

Un espectroradiómetro es un instrumento muy potente y de muy alta precisión diseñado para el análisis de la radiación de ondas electromagnéticas producida por cualquier dispositivo que emita luz, ya sea una fuente de luz como tal (como una bombilla convencional o un LED) o la pantalla de un teléfono u ordenador. (aquateknica, 2017).

En la actualidad un espectroradiómetro es un artefacto muy adecuado para poder medir las ondas electromagnéticas y establecer el estado o situación de los elementos que se desea estudiar. (“Espectroradiómetro”, s/f)



Figura 6 *Espectroradiómetro*

Fuente: (aquateknica, 2017).

El espectro radiómetro es nacido de la unión entre un radiómetro y un espectrómetro para formar un equipo con mejores características de medición.

2.9. Aplicaciones del espectroradiómetro

2.9.1 Espectrómetros para la medición led

Más y más luces incandescentes están siendo reemplazadas por Leds cada día. Leds tienen las ventajas de una mayor eficiencia, especificidad color, tamaño, tiempo de respuesta, tiempo de vida, y muchos otros factores. Los espectroradiómetro son la herramienta perfecta para analizar los LED para la prueba de salida óptica en luminoso y Flujo radiante, irradiación espectral y LUX ya que estos trabajan en el rango 200-2300 nm LED.



Figura 7 *Espectroradiómetro para calibración de led*

Fuente: (SpectroRadiometers- LED Measurement | StellarNet.us)

2.9.2 Sistemas de análisis espectral solar

Los espectroradiómetro son las herramientas perfectas para hacer mediciones de irradiación solar de todo tipo. Son herramientas populares para la medición de simuladores solares y la iluminación artificial para diversa energía solar, biológicas y aplicaciones hortícolas. Los instrumentos son calibrados para medir la irradiación

espectral en unidades de vatios por metro cuadrado en el rango de longitud de onda de 200-2300 nm.



Figura 8. *Análisis spectral solar*

Fuente:(SpectroRadiometers- Solar Measurement Systems | StellarNet.us)

2.9.3 Predicción de la madurez de los aguacates con un sistema de infrarrojo cercano.

La madurez de un aguacate afecta a su sabor, aroma, color y textura. La madurez, sin embargo, es difícil de determinar debido a que la fruta madura sin cambios evidentes en la apariencia externa. Contenido de materia seca se ha establecido como un sustituto de la madurez, pero requiere el corte de la fruta en pequeños trozos y secado en una sucesión de períodos de tiempo en un horno de microondas o el secado durante la noche en un horno de convección (Lee et al., 1983). Los investigadores han demostrado que la reflectancia de infrarrojo cercano (NIRS) puede predecir la materia seca y la posterior maduración de los aguacates en el rango de longitud de onda del 900 - 1700 nm (Olaewaju et. Al, 2016).

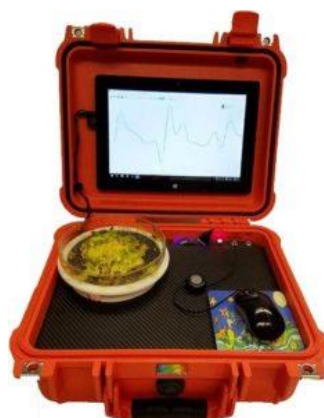


Figura 9. Sistema con el campo 3D de la fijación vista de reflectancia.

Fuente: (Application Note - Predicting Ripeness of Avocados with a Near-Infrared Spectrometer System, 2018)

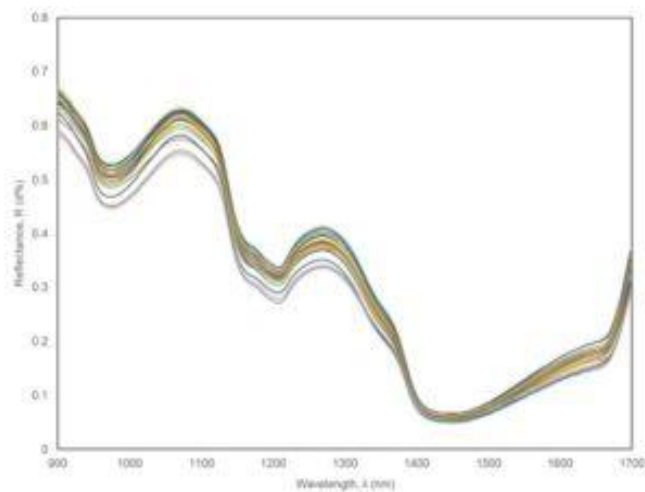


Figura 10. Espectros de reflectancia de los veinte aguacates escaneados con el sistema StellarCASE-NIRS.

Fuente:(Application Note - Predicting Ripeness of Avocados with a Near-Infrared Spectrometer System, 2018)

2.10. Análisis de la ternura de la carne

El procesamiento de la carne típicamente incluye tanto la matanza como el envasado. Ya sea que procesen pollo, cerdo o ternera, las plantas procesadoras de carne se preocupan por la velocidad y la calidad. El color, la textura y el atractivo sensorial son características importantes para la industria. Además, el deseo de los consumidores conscientes de la salud de conocer los datos nutricionales de los alimentos, incluida la carne, ha llevado al uso de espectroradiómetro como una herramienta para analizar tanto la carne cruda como la procesada. El uso del espectro VIS / NIR puede permitir que los procesadores y empaquetadores de carne cumplan con las últimas demandas de los consumidores más conscientes de la salud, las presiones de los precios del mercado y los estándares industriales cada vez más estrictos.

En general, la carne dura absorbe más luz que la carne tierna, los valores de reflectancia asociados con longitudes de onda entre 552-930 nm pueden usarse principalmente. Las mediciones VIS / NIR fueron utilizadas para predecir los valores de fuerza de corte de la rodaja. "Difícil" fue mayor que la mediana predicha, mientras que "tierna" fue menor que el valor predicho de la fuerza de corte de la rodaja.

2.11. Investigación de suelos

La espectroscopia de reflectancia en el rango VIS / NIR se ha utilizado durante años como una herramienta no destructiva para evaluar las propiedades del suelo.

La medición de agua, carbono, nitrógeno y materia orgánica proporciona información crítica sobre la salud del suelo, que incluye:

- Riesgo de erosión
- Propiedades hidráulicas
- Degradación del suelo
- Mapeo y monitoreo de suelos

Los procesos tradicionales de muestreo recolectan muestras de suelo, los preparan para el análisis, los envían al laboratorio y esperan su regreso. Como resultado, muy pocos lugares en los Estados Unidos, y mucho menos en el resto del mundo, tienen mapas de suelos precisos. A medida que crecen las preocupaciones sobre las prácticas agrícolas más eficientes, los efectos del cambio climático, la fertilización excesiva con productos químicos, la erosión y la contaminación, la disponibilidad de la espectrometría de campo para la ciencia del suelo se vuelve cada vez más popular. Además, un espectrómetro de campo o espectroradiómetro ofrece la posibilidad de categorizar con precisión los cambios de suelo / tierra en un área grande.



Figura 11. *Espectroradiómetro ideal para estudios de suelos, incluida la fertilidad del suelo.*

Fuente:(Soils_App_Note_0513.pdf)

2.12. Agricultura de Precisión

La agricultura de precisión es sustentada en datos de sensores remotos para estudios dirigidos al incremento de la productividad de los diferentes cultivos. A partir de estos datos se propone el análisis combinado de parámetros agronómicos determinantes en el crecimiento y rendimiento del cultivo como: el suelo, la fertilización y el riego, factores que pueden ser visualizados espacialmente en imágenes multiespectrales aerotransportadas de alta resolución. Con medidas tomadas con un espectroradiómetro de campo, se puede establecer el comportamiento espectral de los cultivos (cualquier cultivo en estudio) en cada una de sus etapas de desarrollo. De esta forma estaríamos minimizando los costos de producción y demás factores que inciden en la producción y desarrollo del cultivo.(Cadena, 2008)

2.13. Índices de vegetación

Los índices de vegetación son una herramienta importante en estudios de vegetación en el campo, las mediciones de esta reflectancia y absorción pueden proporcionar datos sobre los objetivos. La vegetación que es fotosintéticamente activa absorbe más luz roja y refleja la mayor parte de la luz infrarroja cercana que brilla sobre ella. El Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) funciona como un indicador que describe el verdor o la densidad y la salud de la vegetación en función de la medición de la absorción y la reflectancia.

La mayoría de estos índices están basados en las diferentes interacciones entre la vegetación y la energía electromagnética de las bandas del espectro rojo e infrarrojo. Los IV son calculados a partir de la información espectral contenida en dos o más bandas del VIS o del NIR. Estos índices tienen como objetivo la extracción de información óptima de los objetos investigados. Mirik et al. (2007) y Mandal et al. (2007) afirman que algunos índices son muy útiles en la medición de parámetros de los cultivos tales como, área foliar, porcentaje de biomasa verde, productividad, actividad fotosintética, estrés hídrico y senescencia. (Mera, 2014)

También se especifica la característica del índice o utilidad en su aplicación. Entre las aplicaciones prácticas más destacadas de esta técnica figuran:

- Caracterización y diferenciación de cubiertas vegetales
- Identificación de áreas forestadas-deforestadas
- Evaluación del estado de la vegetación y su grado de estrés
- Separación entre distintos tipos de masas vegetales

- Monitoreo de plagas
- Evaluación de riesgos de incendio

Además existen numerosas variables que se pueden derivar de estos índices como por ejemplo: contenido de agua en las hojas, productividad neta de la vegetación, contenido de clorofila en la hoja, dinámica fenológica, evapotranspiración potencial, etc. Investigadores estudiaron las características de los índices de vegetación, ellos concluyeron que son útiles evaluando la cantidad y el estado de la vegetación a partir de imágenes de satélites.

Sin embargo, se ven limitados por condiciones atmosféricas, ángulos cenitales del sol, así como el tipo de suelo y tipo de vegetación. Para el uso correcto de los índices de vegetación, se requiere tener en cuenta la interacción de todas las condiciones que afectan a sus mediciones al mismo tiempo. (Mera, 2014)

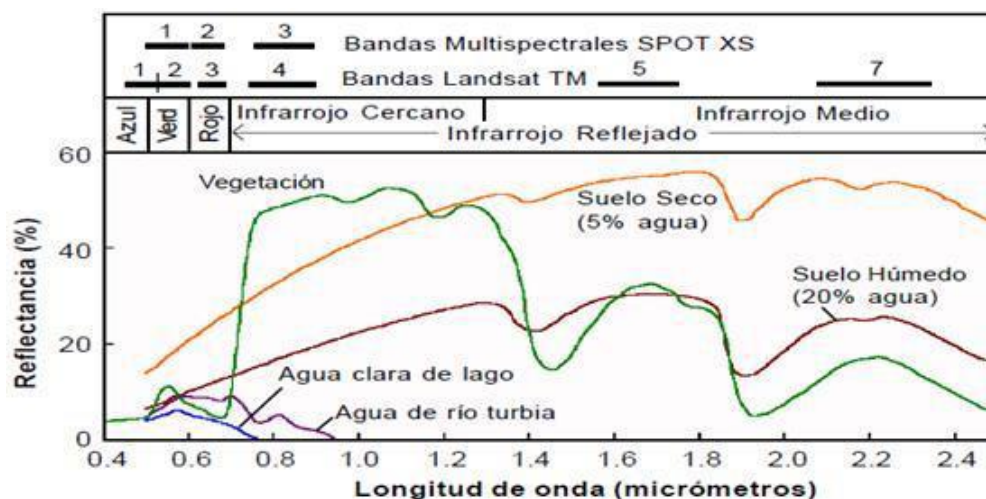


Figura 12. Espectros de reflectancia típicos de la vegetación y el suelo

Fuente: (Abaurrea Pereda, 2013).

2.13.1. Comportamiento espectral de la hoja viva

Las hojas son las responsables de la respuesta espectral de las cubiertas vegetales, también en determinados casos cobran gran relevancia los tallos, las flores y los frutos, cuyas proporciones determinarán en definitiva la signatura espectral de la cubierta.

El estudio de la firma espectral de una masa de hojas permite extraer algunas conclusiones (Ormeño, 1991).

- En el intervalo visible-infrarrojo medio, las hojas presentan tres zonas diferenciadas: una en el visible (0,4-0,7 μm) caracterizada por su baja reflectancia, otra en el infrarrojo próximo (0,7-1,3 μm) y otra en el infrarrojo medio (1,3-2,5 μm).
- En el visible, la reflectancia de las hojas no supera el 15 % y la transmitancia es también pequeña. Esto es debido a que los pigmentos fotosintéticos (clorofilas, xantofila, antocianinas y carotenos) tienen fuertes bandas de absorción en este intervalo espectral. Entre ellos, las clorofilas a y b, que son las más absorbentes con un 65 % del total, presentan dos bandas de absorción centradas en el azul y en el rojo, por lo que producen un máximo relativo en la signatura espectral en torno a los 0,55 μm , responsable del color verde de las hojas.
- En el infrarrojo próximo las hojas presentan una meseta de alta reflectancia (alrededor del 50 %). De la energía restante, la mayor parte es transmitida, ya que la absorbancia es sólo del 10 %, por lo que puede considerarse prácticamente transparente en esta región del espectro. Además hay que considerar que la

energía transmitida podrá ser interceptada por otra hoja, será reflejada con mayor probabilidad y así sucesivamente.

- En el infrarrojo medio, el agua marca su presencia en las hojas produciendo tres fuertes bandas de absorción en la signatura resultante, al igual que ocurre con los suelos: 1,4; 1,9 y 2,5 nm

2.13.2. Propiedades ópticas de las hojas

La espectroscopia y la espectroradiómetro brindan una herramienta importante para el monitoreo del estado ambiental de la vegetación, siendo eficiente tanto en el espacio como en el tiempo. (Huber et al., 2008). Esto se debe a los cambios en el espectro de reflectancia de las hojas sirven como indicadores de diferentes fisionarías, siendo rápidos, no destructivos y relativamente económicos (Adams et al., 2000)

2.13.3. Los Índices Basados en la Pendiente

Los índices basados en la pendiente son combinaciones de las bandas roja visible e infrarroja cercana y se usan extensamente para generar índices de vegetación. Los valores indican tanto el estado como la abundancia de la cobertura y biomasa de la vegetación verde. Los índices incluyen el RATIO, NDVI, RVI, NRVI, TVI, CTVI y el TTVI. El módulo VEGINDEX en IDRISI se puede usar para generar una imagen para cada uno de estos índices. (Abaurrea Pereda, 2013).

a. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Fue introducido por Rouse y colaboradores (1974) para producir un índice espectral que separa la vegetación verde del suelo utilizando datos digitales del LANDSAT MSS. Éste se expresa como la diferencia entre las bandas infrarrojas cercanas y roja normalizada por la suma de esas bandas, es decir:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Este es el índice más comúnmente usado porque retiene la habilidad para minimizar los efectos topográficos y a su vez producir una escala de medida lineal. Además, los errores de división por cero son reducidos en gran medida. Más aún, la escala de medida posee la apreciada propiedad de oscilar de -1 a 1 con el 0 representando el valor aproximado de la falta de vegetación. Entonces, los valores negativos representan las superficies sin vegetación. (Abaurrea Pereda, 2013).

b. El Índice de Vegetación Transformado (TVI)

Deering y colaboradores modificaron el NDVI agregando una constante de 0,50 a todos sus valores y calculando la raíz cuadrada de los resultados. La constante 0,50 se introduce para evitar operar con valores negativos del NDVI. El cálculo de la raíz cuadrada se emplea para corregir los valores del NDVI que se aproximan a una distribución Poisson e introducir una distribución normal. Con estos dos elementos, el TVI toma la siguiente forma:

$$TVI = \sqrt{\left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED}\right) + 0.5}$$

Sin embargo, el uso del TVI requiere que los valores del NDVI de entrada mínima sean mayores que -0,5 para evitar abortar la operación. Los valores negativos aún permanecerán si se hallan valores menores que -0,5 en el NDVI. Es más, no existe una diferencia técnica entre el NDVI y el TVI en términos de la salida de imagen o de la detección activa de vegetación.(Abaurrea Pereda, 2013).

c. El Índice de Vegetación Transformado Corregido (CTVI)

Propuesto por Perry y Lautenschlager (1984) apunta a corregir el TVI. Resulta obvio que agregar una constante de 0,5 a todos los valores del NDVI no siempre elimina los valores negativos porque los valores del NDVI pueden tener el rango -1 a +1. Los valores menores que - 0,5 dejan pequeños valores negativos luego de la operación de adición. Entonces, el CTVI se realiza para resolver esta situación al dividir (NDVI + 0,50) por su valor absoluto ABS (NDVI + 0,50) y multiplicar el resultado por la raíz cuadrada del valor absoluto (SQRT [ABS (NDVI + 0,50)]). Esto suprime el NDVI negativo. La ecuación se escribe:

$$CTVI = \frac{NDVI + 0.5}{ABS(NDVI + 0.5)} \times \sqrt{ABS(NDVI + 0.5)}$$

En el caso que la corrección se aplique de manera uniforme, la imagen de salida que usa el CTVI no debe tener diferencia con la imagen inicial NDVI o la TVI cuando el

TVI lleva a cabo correctamente la operación de raíz cuadrada. La corrección se realiza para eliminar los valores negativos y generar una imagen del índice de vegetación similar a, o mejor que, el NDVI. Sin embargo, Thiam (1997) indica que la imagen resultante del CTVI puede ser muy “ruidosa” debido a una sobrestimación de la cualidad verde. Él sugiere ignorar el primer término de la ecuación CTVI para obtener mejores resultados. Esto se logra simplemente sacando la raíz cuadrada de los valores absolutos del NDVI en la expresión original del TVI para tener un nuevo índice de vegetación llamado Índice de Vegetación Transformado de Thiam (TTVI). (Abaurrea Pereda, 2013).

$$TTVI = \sqrt{ABS(NVI + 0.5)}$$

d. Índice de Vegetación de Cociente (RVI)

Fue sugerido por Richardson y Wiegand (1977) por tener gráficamente la misma fuerzas y debilidades que el TVI (ver arriba) mientras que resulta más simple a nivel computacional. El RVI es claramente el inverso del cociente simple estándar (RATIO) como se muestra en esta expresión:

$$RVI = \frac{RED}{NIR}$$

e. El Índice de Vegetación de Cociente Normalizado (NRVI)

Es una modificación del RVI por Baret y Guyot (1991) por el cual el resultado del RVI - 1 es normalizado sobre el RVI + 1. (Abaurrea Pereda, 2013).

$$NRVI = \frac{RVI - 1}{RVI + 1}$$

f. El Índice de Reflectancia Fotoquímica (PRI)

Es un índice fisiológico sensible al estado de epoxidación de los pigmentos del ciclo de las xantofilas y a la eficiencia fotosintética. El PRI fue propuesto como una diferencia normalizada de la banda de 530 nm, relacionada con la absorción de los pigmentos de las xantofilas, y una franja de referencia localizada a 570 nm. La evaluación del estrés hídrico a escala de dosel a través del PRI es un problema complejo ya que es un índice altamente afectado por las condiciones de luz y estructura. (Hernández-Clemente, 2011).

$$PRI = \frac{X_2 - X_1}{X_2 + X_1}$$

2.14. Equipos existentes en el mercado

2.14.1 Espectroradiómetro PS200

El espectroradiómetro apogee series ps son instrumentos portátiles y compactos de fibra óptica diseñados para mediciones de uv, vis y nir en el rango 190-1150 nm. Incluyen un conversor a/d integrado para una durabilidad y calidad. (idelsur, n.d.)



Figura 13: *Espectroradiómetro PS200*

Fuente: (idelsur, n.d.)

- Espectroradiómetro, robusto y con fibra óptica
- Diseño ergonómico, protegido dentro de una estructura de aluminio y sin partes móviles
- Cable USB para la interfaz de la computadora



Figura 14. *Espectroradiómetro PS200*

Fuente: (idelsur, n.d.)

2.14.2 Espectroradiómetro (SS-110)

El espectroradiómetro SS-110 mide un rango de longitud de onda de 340 nm a 820 nm. El espectroradiómetro es un sistema de medición espectral versátil, fácil de usar y rentable que se puede conectar a una computadora. Las aplicaciones típicas incluyen la medición de la salida espectral (densidad de flujo de energía, densidad de flujo de fotones o iluminación) de diferentes fuentes de radiación (a menudo para iluminación vegetal o humana) y mediciones de reflectancia y transmitancia de superficies y materiales naturales y sintéticos (a menudo hojas y toldos). (Apogee instruments, n.d.)



Figura 15. *Espectroradiómetro (SS-110)*

Fuente: (Apogee instruments, n.d.)

- Cable USB para la interfaz de la computadora.

- Es montado a una estructura.
- Dimensiones: 89.3 mm de altura, 50.8 mm de ancho, 38.1 mm de profundidad.



Figura 16. *Espectroradiómetro (SS-110)*

Fuente: (Apogee instruments, n.d.)

2.14.3 Espectroradiómetro RS 3500

El espectroradiómetro RS 3500 es un equipo completo de mediciones UV-VIS-NIR en un rango de 350-2500 nm con una sola exploración. (Alphaomega-electronics, n.d.)



Figura 17: *Espectroradiómetro RS 3500*

Fuente: (Alphaomega-electronics, n.d.)

- El espectroradiómetro SR-3500 es portátil de campo y sin partes móviles.
- Es ligero y compacto con batería recargable.
- Uso con un ordenador portátil.
- Consta con mochila acolchada con funda protectora de aluminio y montaje en trípode.



Figura 18. *Espectroradiómetro RS 3500*

Fuente: (Alphaomega-electronics, n.d.)

2.15. Punta de tomas de muestra existente en el mercado

2.15.1 Clip de Hoja

Fabricante: Spectral Evolution



Figura 19 *clip de hoja*

Fuente: Spectral Evolution

- Cómodo mango de agarre de primavera.
- Conexiones de fibra SMA-905 para facilidad de uso
- Estándar de reflectancia incorporado
- Disparo externo
- Ligero y fácil de usar, ideal para la vegetación
- Estándar de reflectancia de clip de hoja de repuesto - tornillo en el estilo

2.15.2 Pistola grip

Fabricante: Spectral Evolution



Figura 20. *Pistola grip*

Fuente: (spectral evolution, 2018)

- Mango termoplástico ABS único, cómodo, de baja reflectancia y resistente al impacto con un cómodo orificio de sujeción
- Pulsador de tacto suave y tacto táctil para la recopilación de datos
- El tornillo de mariposa es fácil de colocar y asegura firmemente cualquier cable de fibra óptica y lente
- Ligero y bien equilibrado para el confort de campo
- Riel Picatinny estándar de la industria (Mil-STD-19013) para el montaje de muchas opciones, como visores láser y niveles de burbuja.
- Integrado "vista de la vista"
- Soporte de trípode reforzado para el funcionamiento con manos libres

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

En el presente capítulo se analiza las necesidades y diferentes alternativas para el diseño de un prototipo de espectroradiómetro portátil con el usuario para el sensoriamente aplicado a la agricultura de precisión.

La selección de componentes se toma en cuenta las características de cumplimiento del prototipo como la toma de muestras en el rango de 530-570 nm para el cálculo del índice de vegetación PRI, posteriormente se visualizará en una interfaz mediante conexión bluetooth. El sistema del equipo se compone de su sistema eléctrico, sistema mecánico y un software de adquisición y visualización de datos recolectados en tiempo real.

El diseño del prototipo tiene como necesidad realizar mediciones de reflectancia vs longitud de onda electromagnética en diversas condiciones como, luz natural y artificial cumpliendo su doble funcionalidad del prototipo con la correcta maniobrabilidad del prototipo, A continuación se detallan las partes principales del prototipo.

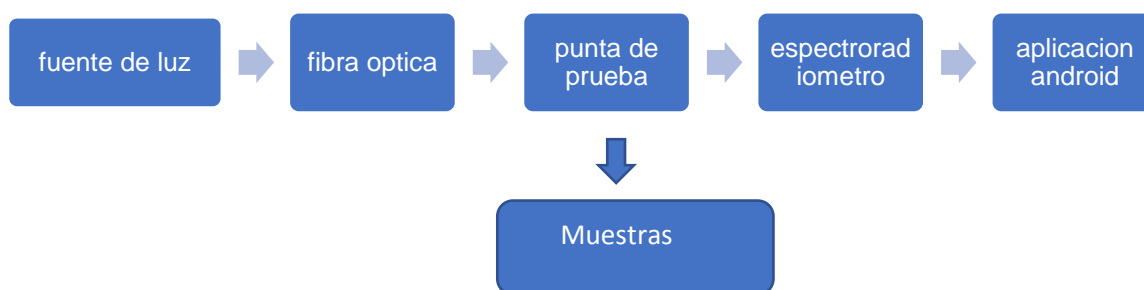


Figura 21. *Modulo del sistema*

El índice de reflectancia fotoquímica establece una ecuación para su determinación de estrés dado por:

$$PRI: \frac{P531 - P570}{P531 + P570}$$

El cual nos permite determinar el estrés que se encuentra la planta, siendo evaluada en un rango de 0 a 0.4 como una planta enferma y un rango de 0.41 a 1 como la mejor calidad que tenga la planta.

Tomando en cuenta todos estos parámetros se analiza tres tipos de espectrómetros para determinar las mejores características que cumplan con las necesidades del prototipo.

Espectrómetro onda Negra



Figura 23. *Espectrómetro de onda negra.*

Fuente: (stellarnet, n.d.)

Características

- Mediciones en el rango de 200-1080 nm o 220-1100 nm.

- Óptica de rejilla cóncava para aplicaciones de alto rendimiento.
- Rejilla cóncava súper rango con doble fuego para una mejor sensibilidad.
- Imagen espectral mejorada sin espejos para la luz dispersa más baja posible.
- Imágenes de campo plano para una resolución uniforme.
- Sin ajustes ópticos para una estabilidad térmica extrema.
- Papel blanco de rejillas cóncavas.
- Precio \$ 2,950.

Espectrómetro onda Azul



Figura 24: Espectrómetro de onda azul.

Fuente: (stellarnet, n.d.)

Características

- Mediciones en las regiones de longitud de onda 200-1150 nm.
- Para aplicaciones de proceso, laboratorio y campo.
- Señal de ruido es igual a 1000: 1
- El gabinete de 1x3x5 pulgadas permitiendo extrema portabilidad.
- Bajo consumo de energía para 2 veces más tiempo de vida en laptops.

- Ideal para aplicaciones.
- Precio \$ 2,700.

Espectrómetro onda Verde



Figura 25: *Espectrómetro de onda verde.*

Fuente: (stellarnet, n.d.)

Características

- Mediciones en las regiones de longitud de onda 350-1150 nm.
- Modelo más asequible con descuentos por volumen disponibles
- Señal de ruido es igual a 400: 1
- El gabinete compacto de 1x3x5 pulgadas permitiendo extrema portabilidad.
- Bajo consumo de energía para 2 veces más tiempo de vida laptops.
- Ideal para la enseñanza, laboratorios y campo.
- Precio \$ 1,948.

Para la selección del espectrómetro se toma en cuenta las características importancia que permitan cumplir con el objetivo y necesidades del prototipo.

Para realizar la selección se propone una tabla de criterios tomando en cuenta los criterios más relevantes para el diseño del prototipo. Esta tabla de comparación ayuda a calificar del 1 al 5 de acuerdo a las necesidades del prototipo siendo 1 la ponderación más baja y 5 la ponderación más alta de acuerdo al criterio.

Tabla 2

Especificación del sensor espectral

| Criterios de selección | Espectrómetro onda negra | Espectrómetro onda azul | Espectrómetro onda Verde |
|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Consumo de energía | 4 | 4 | 4 |
| Facilidad de uso | 5 | 5 | 5 |
| Precio | 2 | 3 | 5 |
| Rango de lectura (530-570 nm) | 5 | 5 | 5 |
| Disponibilidad en el mercado | 3 | 4 | 4 |
| Total | 19 | 21 | 23 |

Por medio de la ponderación de la tabla se llega a la conclusión que el espectrómetro más factible para el prototipo de espectralradiómetro es el espectrómetro de onda verde en cual está disponible el mercado por la marca Stellarnet Inc. En cual proporciona mediciones en las regiones de longitud de onda 350-1150 nm, cumpliendo con las necesidades del prototipo.

Funcionamiento del Espectrómetro onda Verde

El funcionamiento del espectrómetro de onda verde se detalla a continuación, se explica cada parte del detector de acuerdo al gráfico y su enumeración



Figura 26 estructura interna del detector

1. Entrada de fibra óptica SMA905

Se encarga de asegurar la fibra óptica de entrada del espectroradiómetro, la luz procedente de la fibra óptica ingresa al banco óptico por el conector.

2. Abertura

Es una pieza oscura que contiene una ranura rectangular, que se monta directamente al conector de entrada SMA, el tamaño de la ranura es de 5 micras por 500 micras, la cual regula la cantidad de luz que entra al banco óptico y controla la resolución espectral del sensor.

3. Espejo colimador

El espejo colimador se encarga de enfocar la luz que entra al banco óptico hacia el retículo del espectroradiómetro, a su vez impide el paso de partículas que se separan de la dirección elegida y coincide con el rayo central del sistema.

4. Filtro de entrada

Este filtro se encarga de restringir la radiación, dejando pasar la longitud de onda establecida por el detector, por lo cual está constituida por dos filtros de entra, un filtro pasa banda y otro filtro pasa alto, estos filtros restringen la radiación a ciertas regiones de longitud de onda.

5. Espejo de enfoque

Recibe la luz reflejada desde la rejilla y enfoca los espectros en el plano detector.

6. Rejilla

Difunde la luz del espejo de colimación y dirige la luz difractada hacia el espejo de enfoque, esta rejilla permite especificar las longitudes de onda y la resolución del espectroradiómetro.

7. Detector UV VIS

Recoge la luz recibida del espejo de enfoque y convierte la señal óptica en señal digital. Cada pixel en el detector responde una longitud de onda que incide sobre ella, y la convierte en una respuesta digital para luego transmitir la señal digital a la aplicación móvil.

3.2. Selección del cable de fibra óptica

Teniendo en cuenta el rango de utilidad del prototipo y espectrómetro se tomando en cuenta la utilidad en su calibración y forma de trabajo para el prototipo.

Los cables de fibra óptica bifurcados o en Y proporcionan una manera fácil de transmitir luz sin necesidad de alinear el sistema o atenuar la señal. La luz se puede transferir fácilmente desde una fuente de luz a un soporte que contiene una muestra y luego de vuelta a un espectrómetro para su detección.

a. Características del Cable de fibra óptica

Los cables de fibra óptica multimodal y de filamento simple están disponibles con conectores SMA 905, armadura de una sola bobina de acero de un cuarto de pulgada de diámetro con una chaqueta de PVC negra. Los tamaños incluyen diámetros de núcleo de 400, 600 o 1000 μm . Para los sistemas Stellarnet, el diámetro de la fibra de 600 μm es el más popular, ya que es lo suficientemente robusto como para enrollarse en su silla de laboratorio y proporciona una señal de alta luz. (stellarnet, n.d.)

La fibra es resistente a la solarización (-SR) disponibles para aplicaciones UV profundas por debajo de 400 nm disponibles en todos los diámetros. Las opciones VIS-NIR son bajas en fibras OH (400-2200 nm) necesarias para las aplicaciones VIS-NIR. Ofrecen la menor atenuación de luz interna posible. Destinado a aplicaciones con longitudes largas de fibra, disponible en todos los diámetros. (stellarnet, n.d.)

Las fibras especiales y los conectores están disponibles para diversas aplicaciones. Cables en Y para acoplar 2 sistemas de espectrómetros, cables en forma de Y para acoplar 2 fuentes de luz, 1 a 3 cables divisores y todo tipo de fibras y conectores personalizados para cumplir con su aplicación. (stellarnet, n.d.)

Tabla 3

Especificación de la fibra óptica

| Peso: | Variable |
|---|--|
| Longitud: | 1 - 2 metros o personalizado |
| Rango espectral: | 190 - 2200 nm |
| Apertura numérica: | 0.22 NA |
| Ángulo del cono | 25.4 grados |
| Material de fibra: | Núcleo de sílice - revestido de sílice |
| Diámetro: | 400 µm o 600 µm o 1000 µm |
| Rango de temperatura: | 0 - 50 Deg C (temperatura alta disponible) |
| Umbral de Daño Láser (típico) | > 5 J / mm ² pulso > 100 kW / mm ² cw |
| Radio de curvatura (corto y largo plazo) | 400µm: 2.6 "y 5,2" 600µm: 3.9 "y 7.8" 1000µm: 6.5 "y 13" |
| Conectores | SMA 905 (FC / PC opcional o descubierto) |

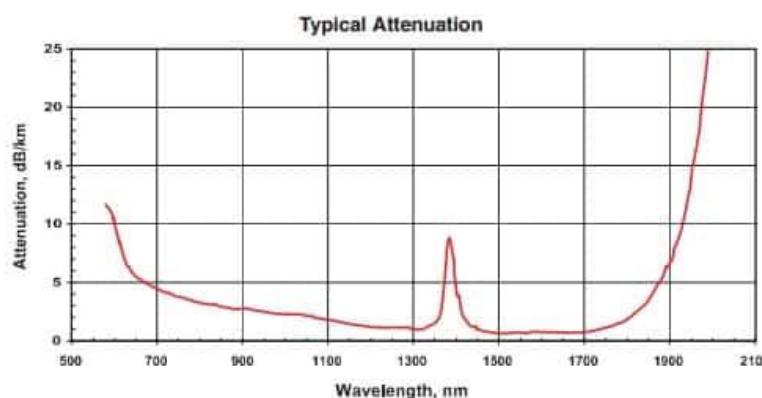


Figura 27. Curva de atenuación típica para el cable de fibra óptica F600-VISNIR

Fuente: (stellarnet, s.f.)

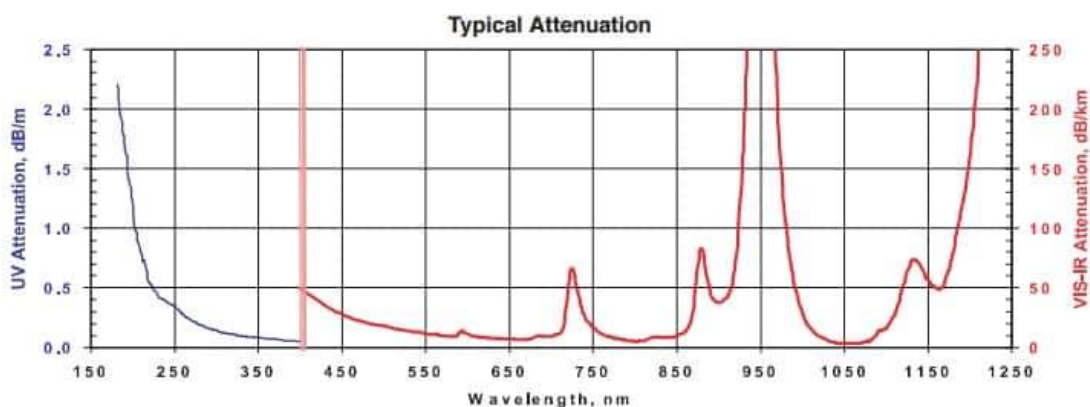


Figura 28. Curva de atenuación típica para el cable de fibra óptica F600-UVVIS-SR

Fuente: (stellarnet, s.f.)

Tomando en cuenta las necesidades del prototipo, analizando las características técnicas y la curvatura de atenuación típica de las imágenes anteriores se determina que el cable de fibra óptica más adecuado para el prototipo es el siguiente.

F600-Y-UVSRNIR, Cable Y armado, 1 metro, 1 SMA a 2 SMA, SR + NIR



Figura 29. F600-Y-UVSRNIR

Fuente: (stellarnet, s.f.)

3.3. Selección del procesador

Para la selección del procesador de datos del prototipo se toma en cuenta el tiempo de transmisión de datos, procesamiento de datos, periféricos y disponibilidad en el mercado cumpliendo con necesidades del diseño. En este caso se analiza tres tipos de procesadores.

Tabla 4

Especificación del procesador

| Características | PIC | Arduino | Raspberry Pi |
|-------------------------------------|------------|----------------|---------------------|
| Transmisión de datos | 4 | 3 | 5 |
| Procesamiento de datos | 2 | 3 | 4 |
| Periféricos | 3 | 4 | 5 |
| Disponibilidad en el mercado | 5 | 5 | 5 |
| Resultados | 14 | 15 | 19 |

Esta tabla ayuda a calificar del 1 al 5 de acuerdo a las necesidades del prototipo siendo 1 la calificación más baja y 5 la calificación más alta. Por medio de la ponderación de la tabla se determina que Raspberry Pi es la opción más adecuadas para el prototipo.

Raspberry Pi es un ordenador en miniatura al que se le pueden conectar los mismos periféricos que a cualquier otro ordenador. (Cruceira, 2017)

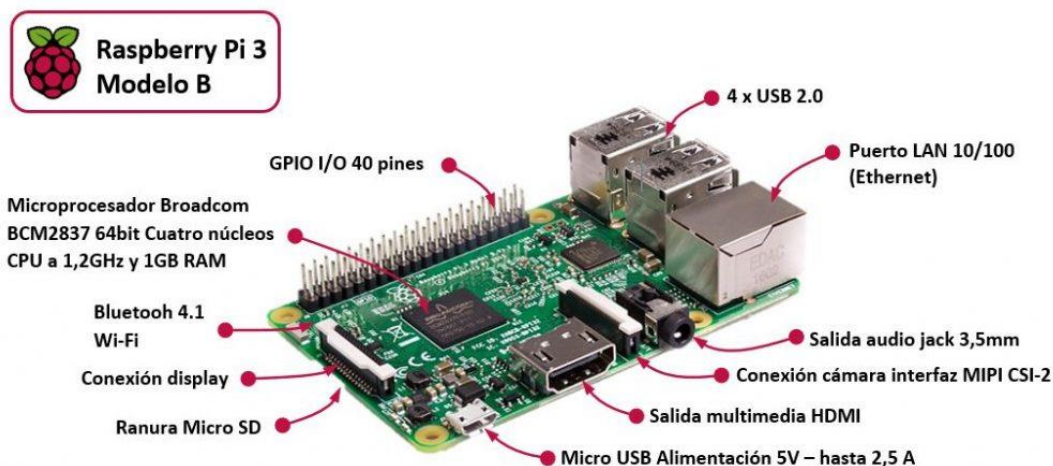


Figura 30. Características de una tarjeta Raspberry Pi 3

Fuente: (Cruceira, 2017)

Tabla 5

Especificaciones de la tarjeta Raspberry Pi 3

Raspberry Pi 3

| | |
|------------------------|--|
| Alimentación | 5 V DC |
| Microprocesador | Chipset Broadcom BCM2387. 1,2 GHz de cuatro núcleos ARM Cortex-A53 |
| RAM | 1GB LPDDR2. |
| Conectividad | Ethernet socket Ethernet 10/100 BaseT 802.11 b / g / n LAN inalámbrica y Bluetooth 4.1 (Classic Bluetooth y LE) Salida de vídeo HDMI rev 1.3 y 1.4 RCA compuesto (PAL y NTSC) Salida de audio: jack de 3,5 mm de salida de audio, HDMI USB 4 x Conector USB 2.0 |

3.4. Selección de la comunicación

Tomando en cuenta la portabilidad, movilidad, funcionabilidad y periféricos de la comunicación raspberry pi 3 se determina que el prototipo de espectroradiómetro debe tener una transmisión de datos en forma de una comunicación inalámbrica. En este caso se analiza dos tipos de conexión inalámbrica.

Tabla 6

Selección de comunicación

| Criterios | Bluetooth | Red Wifi |
|-------------------------------|------------------|-----------------|
| Movilidad del equipo | 5 | 4 |
| Transmisión de datos | 4 | 4 |
| Periféricos | 4 | 4 |
| Facilidad de recepción | 5 | 5 |
| Resultados | 18 | 17 |

La tabla 6 ayuda a calificar del 1 al 5 de acuerdo a las necesidades del prototipo de espectroradiómetro siendo 1 la calificación más baja y 5 la calificación más alta, determinando de esta manera que la comunicación bluetooth es la mejor opción para la comunicación de datos para el prototipo.

3.5. Selección de Software para la comunicación de datos.

Para la comunicación bluetooth se procede a elegir un sistema operativo el cual proporcione los drives de lectura de datos del espectrómetro. Teniendo en cuenta que

los drives del espectrómetro deben ser previamente instalados para el encendido del espectrómetro.

El entorno de trabajo para realizar la comunicación bluetooth del prototipo de espectralímetro puede realizarse en el sistema operativo Windows y Linux.

Tabla 7

Selección del software

| Criterios de selección | Windows | Linux |
|-------------------------------|----------------|--------------|
| Drives | 5 | 3 |
| Aplicaciones | 1 | 4 |
| Fiabilidad | 1 | 4 |
| Información | 1 | 4 |
| Costo e licencias | 2 | 5 |
| Resultados | 10 | 20 |

La tabla 7 ayuda a calificar del 1 al 5 de acuerdo a las necesidades del prototipo, siendo 1 la calificación más baja y 5 la calificación más alta. Por medio de la ponderación más alta en los criterios de selección se determina que el sistema operativo más óptimo para el prototipo es Linux.

3.6. Selección del Software para el desarrollo de la interfaz.

Para el diseño de una interfaz se procede a elegir un software que tenga una plataforma de programación viable con las necesidades del prototipo de espectralímetro.

El software tiene la función de graficar los espectros obtenidos de las diferentes muestras y mostrarlos en la una interfaz. Para la visualización de las muestras se realiza

una aplicación con comunicación vía bluetooth, entre el prototipo del espectroradiómetro y un dispositivo Androide.

Para la creación de la aplicación se utiliza, Androide Studio que es un entorno de desarrollo integrado (IDE) oficial para el desarrollo de aplicaciones para Androide y se basa en IntelliJ IDEA. Además del potente editor de códigos y las herramientas para desarrolladores de IntelliJ, Androide Studio ofrece aún más funciones que aumentan tu productividad durante la compilación de apps para Androide. (developer, 2018).

3.7. Fuente de luz artificial

En el mercado existen muchas opciones para la elección de luz artificial pero se debe tener en cuenta el consumo energético, el rango de trabajo del PRI para la selección.

El prototipo busca como objetivo determinar el índice de vegetación (PRI) que trabaja en el rango de 531 a 570 nanómetros (nm). Por lo tanto trabaja en la luz visible que es una parte del espectro electromagnético lo cual es comprendida desde los 320 a 780 nanómetros (nm).

En la siguiente imagen se observar la longitud de onda de cada tipo de luz, con una gráfica que muestra el espectro de colores. Tomaremos como “ideal” la luz del sol y así podemos comprar con ésta, los espectros de las diferentes lámparas más utilizadas.

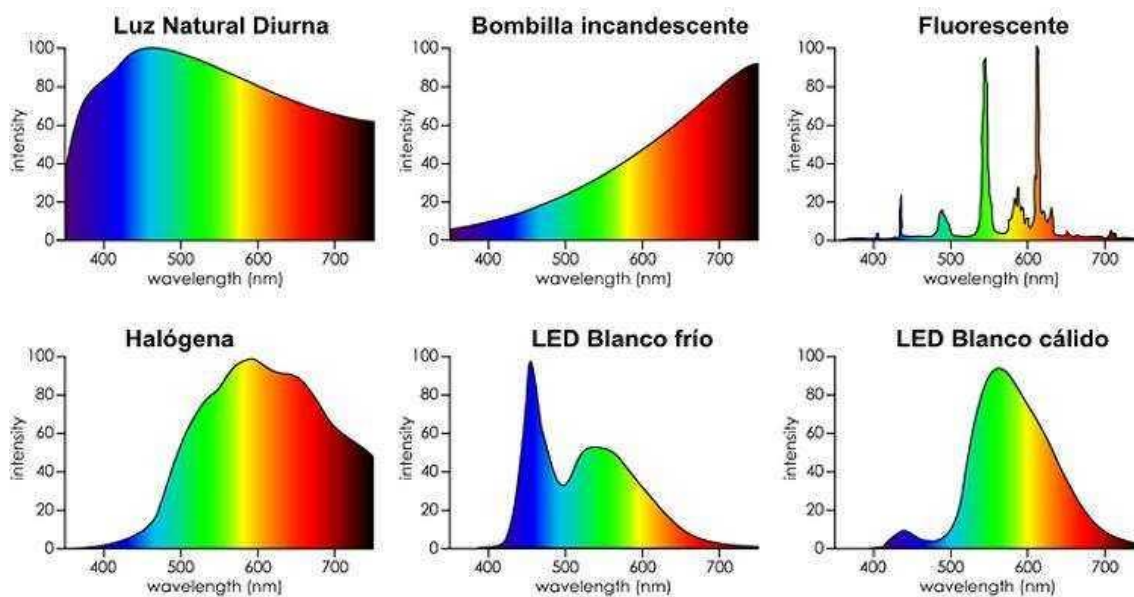


Figura 31: longitud de onda de cada tipo de luz en muestra de espectro de colores.

Fuente: (luz artificial, s.f.)

Considerando los diferentes espectros de la imagen anterior se optaría por elegir entre luz halógena y luz led que son las más parecidas a la luz del sol.

Considerando el consumo energético de la luz artificial se analiza la siguiente tabla

Tabla 8.

Equivalentes de energía eléctrica para las diferentes lámparas

| Flujo luminoso "mínimo" (lumen) | Potencia eléctrica (vatio) | | |
|---------------------------------|----------------------------|-------|-------|
| | Halógena | CFL | LED |
| 450 | 35 | 9–13 | 4-9 |
| 800 | 40 | 13–15 | 10-15 |
| 1,100 | 50 | 18–25 | 10-15 |

Debido al bajo consumo de vatios se determina que se utilizara luz led, de este modo se brinda un espectro de trabajo (índice de reflectancia fotoquímico), poca temperatura y un consumo realmente bajo y económico para el prototipo.

Considerando la radiación electromagnética como onda, se obtiene la siguiente ecuación para determinar la frecuencia de trabajo del índice de vegetación PRI.

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

f = frecuencia (Hz)

c= la velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8$ m/s)

λ = longitud de onda (1 nm= 10^{-9} m)

Considerando la longitud de onda de trabajo calculamos la frecuencia de trabajo para determinar el índice de vegetación PRI.

$$\lambda_1 = 531 \text{ nm}$$

$$\lambda_2 = 570 \text{ nm}$$

Calculo de frecuencia para la primera longitud de onda.

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$f = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{531 \cdot 10^{-9} \text{ m}}$$

$$f_1 = 5,65 * 10^{-4} \text{ Hz}$$

Calculo de frecuencia para la segunda longitud de onda.

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$f = \frac{3 * 10^8 \text{ m/s}}{579 * 10^{-9} \text{ m}}$$

$$f_2 = 5,26 * 10^{-4} \text{ Hz}$$

Se determinó que la frecuencia de trabajo del prototipo esta entre la $f_2 = 5,26 * 10^{-4} \text{ Hz}$ y la $f_1 = 5,65 * 10^{-4} \text{ Hz}$.

Tabla 9

Características de la fuente de luz artificial

| Descripción | Led blanco |
|------------------------|----------------|
| Longitud de onda | 360 – 800 (nm) |
| Estabilidad | 0.6% |
| Alimentación | 5 voltios |
| Tiempo de vida | 30.000 horas |
| Temperatura de trabajo | -20 / 45° C |
| Potencia | 3W |

3.8. Selección de la fuente de energía

Para seleccionar la fuente de energía más idónea para el prototipo se toma en cuenta el peso para la movilidad y el consumo de energía del espectrómetro, la raspberry Pi y la luz led, cumpliendo con las necesidades del diseño.

Datos

Luz led

V =5 V DC

P = 3 W

Cálculos para la primera batería.

Calculo de la corriente

$$I = \frac{P}{V} = \frac{3W}{5V}$$

$$I = 0.6 A$$

Teniendo en cuenta la corriente de la luz halógena se procede a calcular la capacidad de una batería teniendo en cuenta el tiempo de consumo en este caso 1 hora.

$$C = I * t$$

$$C = 0.6 A * 1 h$$

$$C = 0.6 Ah$$

Factor de seguridad de la batería=1.1

Factores caídas de tensión en la batería= 1.2

$$C_{final} = 1.1 * 1.2 * C$$

$$C_{final} = 1.1 * 1.2 * 0.6A$$

$$C_{final} = 0.79 A$$

Raspberry Pi 3

$$I = 700 \text{ mA}$$

$$V = 5 \text{ V}$$

Espectrómetro

$$V = 5 \text{ V}$$

$$I = 1 \text{ A}$$

Cálculos para la segunda batería

En este caso vamos a conectar el raspberry Pi 3 en común con el espectrómetro.

$$I_{total} = I_1 + I_2$$

$$I_{total} = 700\text{mA} + 1\text{A}$$

$$I_{total} = 1.700\text{mA}$$

El tiempo de consumo es 1 hora

$$C = I * t$$

$$C = 1.700 \text{ A} * 0.792 \text{ h}$$

$$C = 1.34 \text{ Ah}$$

Factor de seguridad de la batería=1.1

Factores caídas de tensión en la batería = 1.2

$$C_{final} = 1.1 * 1.2 * C$$

$$C_{final} = 1.1 * 1.2 * 1.34A$$

$$C_{final} = 1.76 A$$

En este caso se analiza tres diferentes tipos de fuentes de energía.

Tabla 10

Selección de la fuente de energía

| Criterios | Lipo | alcalinas | Pila seca |
|-------------------------------------|-------------|------------------|----------------------|
| Tiempo de uso | 5 | 3 | 4 |
| Bajo peso | 4 | 4 | 3 |
| Bajo costo | 3 | 4 | 4 |
| Disponibilidad en el mercado | 5 | 5 | 4 |
| Resultados | 17 | 16 | 15 |

Batería lipo

La batería lipo están caracterizadas como recargables, su funcionamiento, se basa en el intercambio de iones y litio entre los ánodos y cátodos de celda a celda, utiliza una lámina de polímeros electrolítico seco, el cual separa del ánodo y cátodo.

Cada celda de la batería proporciona 3.7 voltios y 4.2 voltios en su carga máxima, internamente pueden estar conectadas en serio o paralelo.

Tabla 11

Tipo de baterías de lipo

| notación | Numero de celdas | Voltaje (V) |
|----------|------------------|-------------|
| 1S | 1 | 3.7 |
| 2S | 2 | 7.4 |
| 3S | 3 | 11.1 |
| 4S | 4 | 14.8 |
| 5S | 5 | 18.5 |

La capacidad de las baterías se expresa en miliamperios hora (mach), el tamaño y su peso esta proporcionado a tu capacidad, para lo cual el prototipo ocupara la siguiente batería con las siguientes características.



Figura 32 *Batería lipo 3,7 V*

Características

- Voltaje mínimo recomendado: 3V.
- Ya tiene dos cables para conexión.
- Salida: 1000mAh con voltaje nominal.
- Dimensiones: 67x35x6 mm.
- Peso: 24 g.

Esta tabla nos ayuda a calificar de 1 al 5 de acuerdo a las necesidades de la fuente de energía para el prototipo siendo 1 la calificación más baja y 5 la calificación más alta. Por medio de la ponderación de la tabla se determina que las baterías tipo Lipo son las más adecuadas para el prototipo.

3.9. Punta de muestra

Para el sistema de detección se debe tomar en cuenta la punta de muestra ya que es considerada una herramienta para la obtención de datos en el muestreo, la misma debe atenuar el ruido y posibles perturbaciones en el medio de trabajo. Para lo cual se construirá de manera que este sellado herméticamente, libre del ruido ambiental.

La punta de muestra es la encargada de realizar la conexión física entre el prototipo y la muestra, evitando de esta manera una alteración en las medidas.

3.9.1. Diseño estructural de la punta de muestra

El diseño de la punta de muestra parte de la necesidad de la toma de datos más estable y eficiente con el objetivo de evitar perturbaciones ambientales que afecten a la toma de datos.

Por lo cual se toma en cuenta la presión que puede ejercer una mano humana, según estudios realizados por la universidad centro occidental Lisandro Alvarado, los seres humanos aplican según el sexo y edad que tenga el individuo como se muestra en las siguientes figuras.

| EDAD (años) | MANO DERECHA | | MANO IZQUIERDA | | Nº de Casos |
|----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | \bar{X} | (Kgrs) D.E. | \bar{X} | (Kgrs) D.E. | |
| <= 19 | 43.95 | 6.69 | 42.00 | 6.71 | 21 |
| 20 – 29 | 43.11 | 7.88 | 42.22 | 8.70 | 68 |
| 30 – 39 | 45.73 | 8.08 | 41.40 | 7.11 | 15 |
| 40 – 49 | 38.91 | 6.98 | 39.33 | 7.39 | 12 |
| 50 y más | 39.80 | 4.65 | 40.60 | 6.80 | 5 |

Figura 33 *Presión ejercida por un hombre*

| EDAD (años) | MANO DERECHA | | MANO IZQUIERDA | | Nº de Casos |
|----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | \bar{X} | (Kgrs) D.E. | \bar{X} | (Kgrs) D.E. | |
| <= 19 | 25.60 | 3.72 | 23.78 | 5.26 | 23 |
| 20 – 29 | 27.34 | 5.18 | 24.73 | 4.68 | 23 |
| 30 – 39 | 25.95 | 5.49 | 24.04 | 5.06 | 21 |
| 40 – 49 | 26.58 | 5.6.3 | 24.76 | 4.56 | 17 |
| 50 y más | 23.25 | 4.03 | 19.75 | 2.87 | 4 |

Figura 34 *Presión ejercida por una mujer*

3.9.2. Selección del material de diseño para la punta de muestreo

Para la selección del material de la punta de muestreo se toma en cuenta el peso y la accesibilidad de diseño del material, por lo que se ha tomado en cuenta tres materiales accesibles en el mercado.

- Aluminio.
- PLA (poliácido láctico).
- Acero estructural.

Por la siguiente tabla de selección y comparación se califica del 1 al 5 de acuerdo a las necesidades del prototipo siendo 1 la ponderación más baja y 5 la ponderación más alta de acuerdo al criterio necesario del prototipo.

Tabla 12

Criterio de selección del material para la punta de muestreo

| Criterios de selección | Aluminio | PLA | Acero estructural |
|-------------------------------------|-----------------|------------|------------------------------|
| Alta resistencia | 4 | 3 | 5 |
| Bajo peso | 3 | 5 | 1 |
| Bajo costo | 3 | 4 | 4 |
| Disponibilidad en el mercado | 3 | 4 | 5 |
| Facilidad de diseño | 3 | 5 | 3 |
| Resultados | 16 | 21 | 18 |

Tomando en cuenta la ponderación más alta de la tabla se utiliza PLA (poliácido láctico) como material, para la estructura de la punta de muestreo.

La punta se realizó con material la cual tiene las siguientes características

Tabla 13

Características del PLA o poliácido láctico

| Propiedad | Característica |
|---------------------------------------|--------------------------|
| Alargamiento de rotura | 35% |
| Coefficiente de fricción | 0.3 |
| Módulo de elasticidad | 3.37 GPa |
| Resistente a tracción | 48 MPa |
| Coefficiente de Poisson | 0.3 |
| Resistente al impacto | 5 kJm ⁻² |
| Temperatura de tracción vítrea | 65° |
| Densidad | 1.25 gr cm ⁻³ |

Se debe tomar en cuenta la distancia que debe permanecer el cable de fibra óptica respecto de la muestra, para lo cual se calcula la altura como se muestra en la siguiente figura.

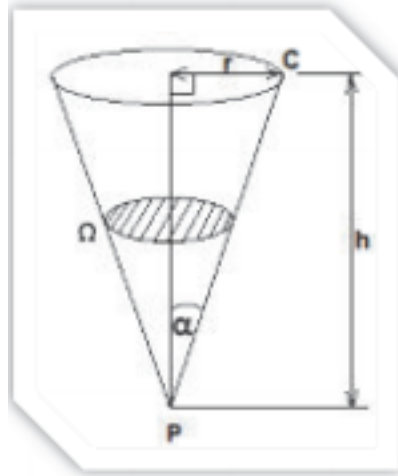


Figura 35 Construcción de la cavidad cónica de la punta de muestra

Donde:

C: diámetro de la fibra óptica

Ω : ángulo solido

h : altura

α : semiángulo del cono definido por P

Para lo cual dichos datos nos entrega el fabricante del cable de fibra óptica, teniendo un ángulo de apertura de 25.4° , con un diámetro de la fibra óptica de

0.625 cm, se procede a calcular la distancia del triángulo rectángulo formado por los punto P,C,r aplicando geometría plana

$$\tan \alpha = \frac{r}{h}$$

$$h = \frac{r}{\tan \alpha}$$

$$h = \frac{0.313}{\tan 25.4}$$

$$h = 0.66 \text{ cm}$$

Con este proceso se puede determinar la altura que estará la fibra óptica de la muestra la cual será de 0,66 c.

3.9.3. Diseño de la punta de muestra

La punta de muestra se desarrolla por medio del software SolidWorks que es una plataforma de diseño mecánico que permite la simulación de mecanismos en 3D además se realizara el análisis de esfuerzo de cada elemento que conforma el prototipo. Para lo cual se tomara en cuenta los diferentes parámetros de diseño de la punta de muestra.

Como:

- Debe ser de fácil armado tanto como para luz natural y artificial.

- Para la correcta manipulación de la fibra óptica se debe colocarse a 0.66 cm de la muestra.

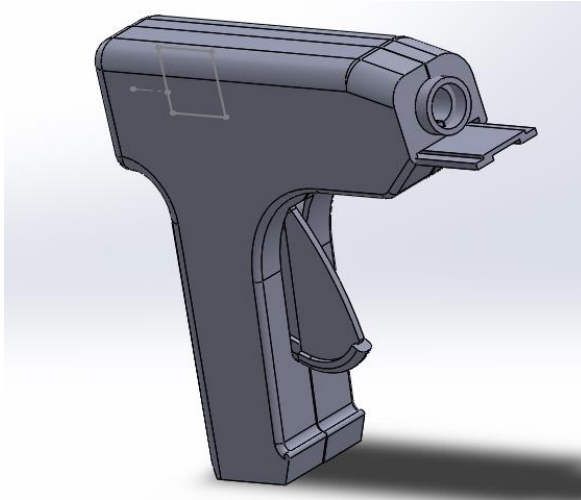


Figura 36 *Punta de muestra*

El análisis de esfuerzo se usa nos permite visualizar las diferentes teorías de fallas con indicador de un buen diseño mecánico y una buena selección de materiales.

- La tensión de Von Mises: propone que el material dúctil sufrirá fallo elástico cuando la energía de distorsión elástica rebase cierto valor.
- El desplazamiento de fuerzas: con este método se verifica en que parte de la pieza sufre un mayor fallo elástico y en qué punto se encuentra la mayor cantidad de fuerza que deformen a la pieza.

- El factor de seguridad: es factor de seguridad debe ser mayor que 1.0 para evitar falla. Dependiendo las circunstancias varían desde 2 hasta 10

a. Carcasa de la punta de toma de muestras

La punta de toma de muestras consta con dos partes desmontables que se sujeta a través de tornillos de sujeción, por donde pasa la fibra óptica y queda acoplada evitando el desplazamiento del mismo.

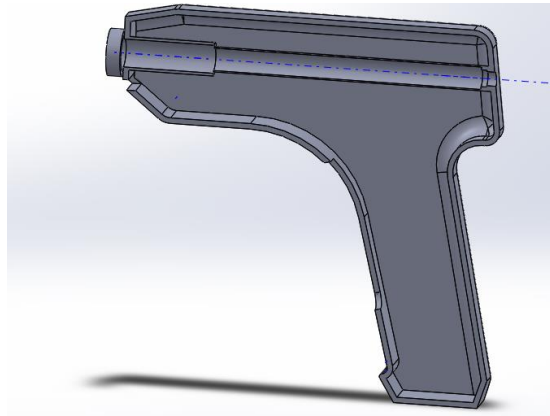


Figura 37 *Carcasa derecha*

A continuación se procede a realizar los diferentes análisis de esfuerzo que determinara los diferentes puntos de deformación por la manipulación de la pieza, donde se ha tomado en cuenta la fuerza máxima que ejerce una mano humano que es de 245 N, como se puede observar en la figura 25.

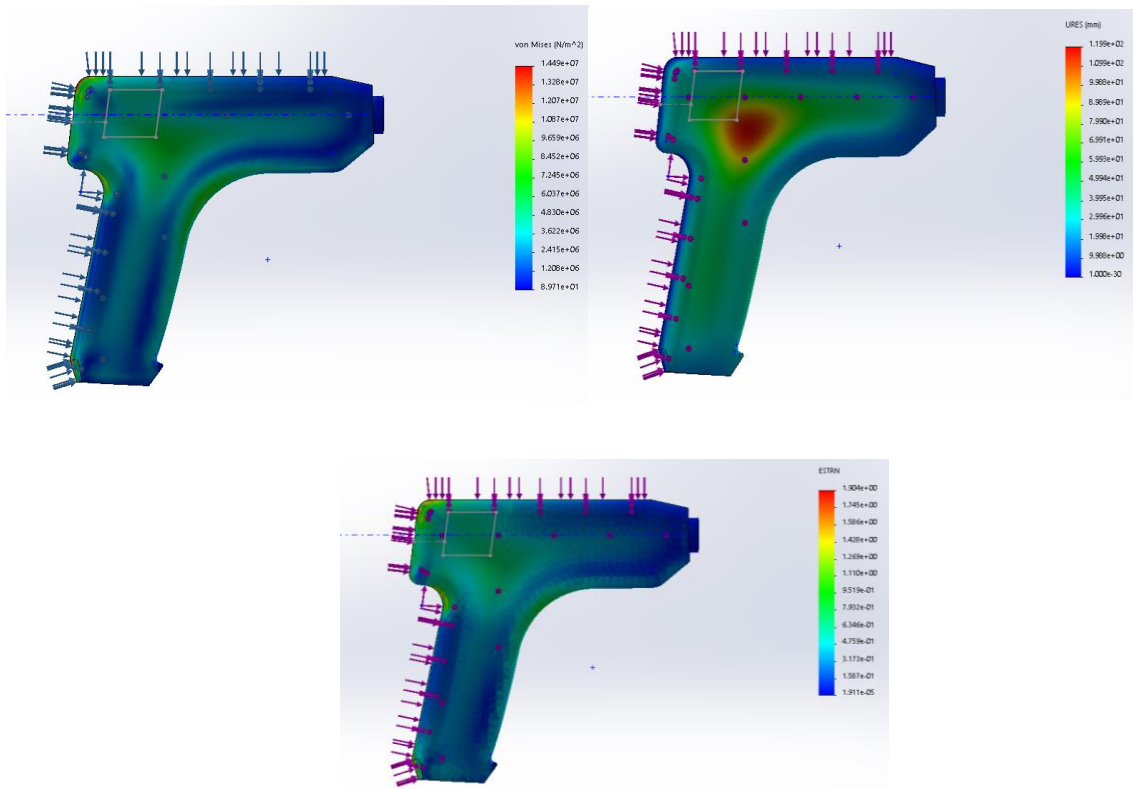


Figura 38 análisis de esfuerzos de la carcasa derecha

La carcasa derecha de la punta de muestra consta con una sección circular alargada, por donde pasa la fibra óptica evitando así su deslizamiento, además, en la parte inicial de la carcasa consta con una extrusión circular donde se inserta los acoples para el funcionamiento del sistema en luz artificial, por lo cual debe estar herméticamente cerrado que no exista perturbaciones con el medio ambiente.

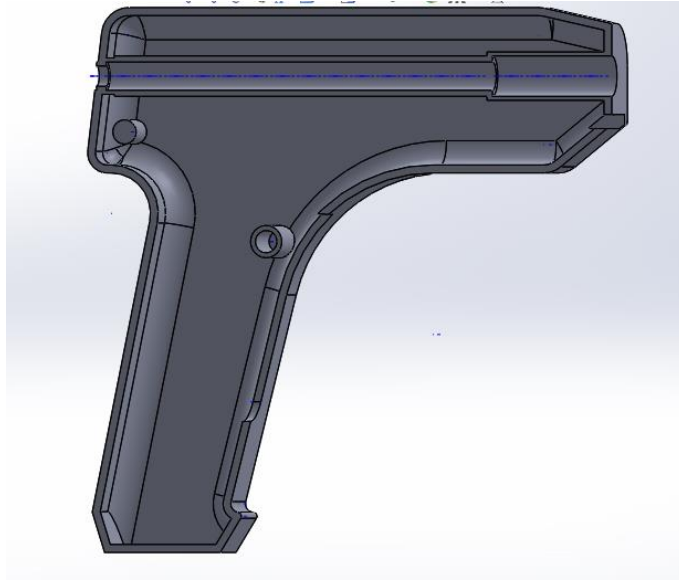


Figura 39 *Carcasa izquierda*

La carcasa izquierda se aloja el mecanismo de la toma de muestra la cual ayuda a la mejor captación de datos.

b. Mecanismo de la punta de muestra

El mecanismo de la punta de muestra se activa el sistema atreves del gatillo, la cual hace que el mecanismo cambie su posición y pueda ingresar la muestra para la obtención de datos.

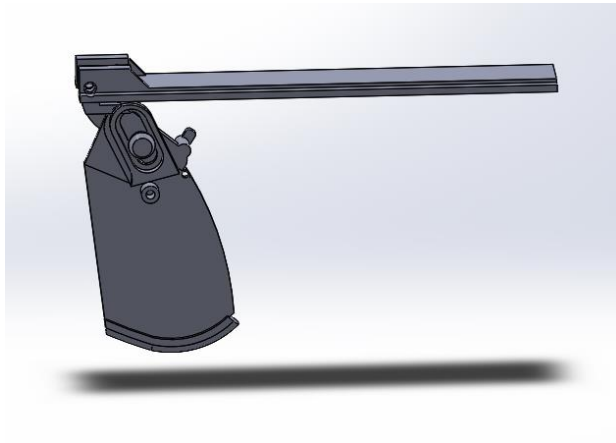


Figura 40 Mecanismo de la punta de muestra

Riel del mecanismo

Su funcionamiento es abrir al mecanismo donde se sujeta los acoples, el cual se abre para colocar la muestra.

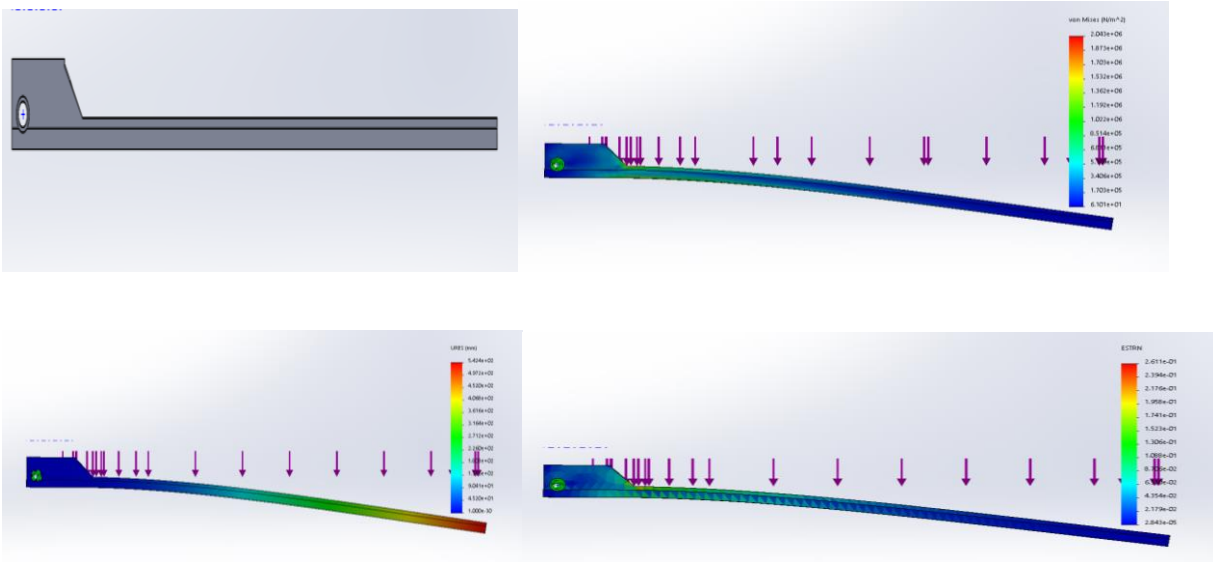


Figura 41 análisis de esfuerzo del riel del mecanismo

Tornillo de sujeción del mecanismo

Su funcionamiento es acoplarse con el riel del mecanismo y el gatillo el cual integra el desplazamiento del mismo.

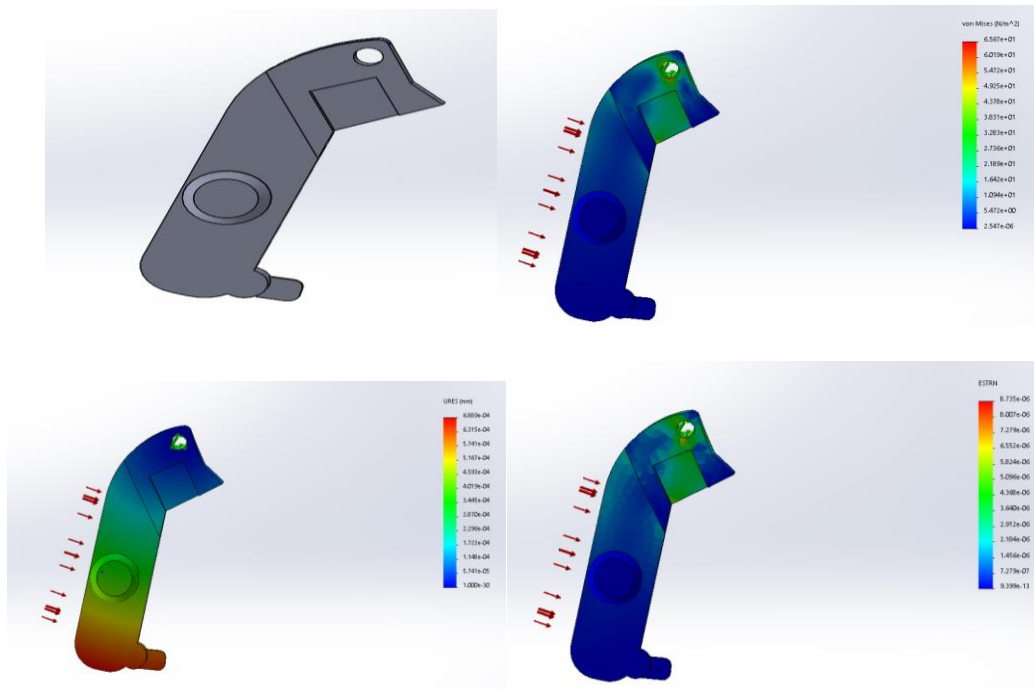


Figura 42 *Análisis de esfuerzo del tornillo de sujeción*

En el análisis de esfuerzos se puede observar que a 0.5 N, no existe una deformación notable en el tornillo de sujeción del mecanismo.

Gatillo

El funcionamiento del gatillo es el encargado de activar el mecanismo para lo cual se toma como referencia la máxima fuerza que aplica un dedo que es 98 N.

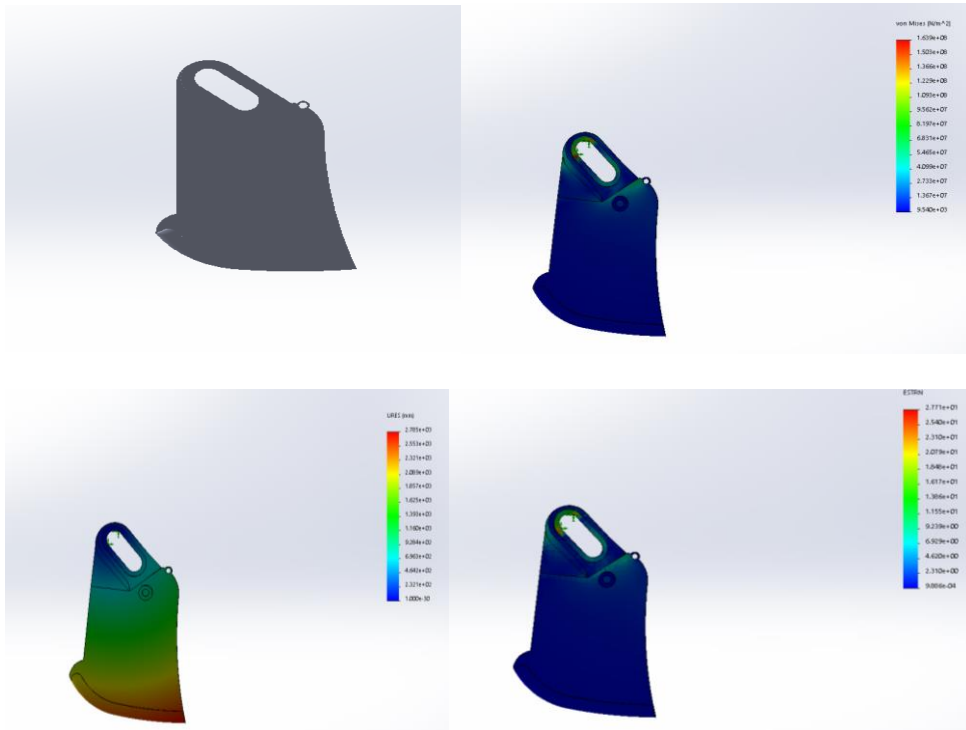


Figura 43 *Análisis de esfuerzos del gatillo*

En el análisis de esfuerzos se puede denotar que no existe deformación el gatillo por lo cual el mecanismo funcionaria adecuadamente.

c. Acoples para la punta de muestra

c.1. Sistema de luz artificial

El funcionamiento de equipo depende de los acoples que se coloque en la punta de muestra, por lo cual es necesario que el sistema esté cerrado y no exista perturbaciones en el medio que se calibre

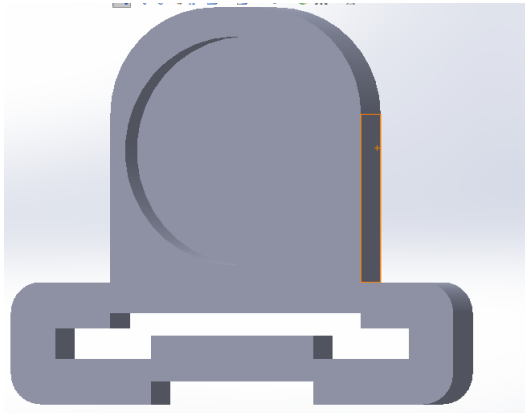


Figura 44 *Acople calibración artificial*

Acople de calibración artificial tiene un espacio para colocar el yeso, donde se toma la referencia para la calibración en blanco del sistema a su vez se acopla con el acople de la figura 32, permite que el sistema se encuentre cerrado para una mejor calibración.

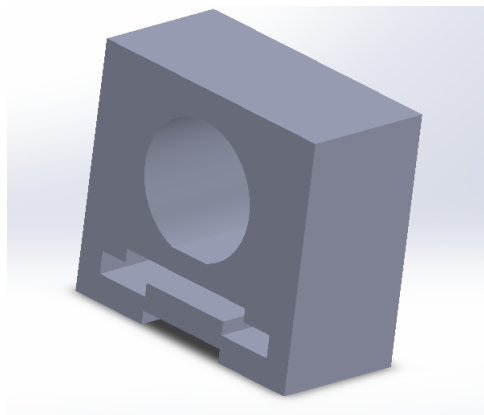


Figura 45 *Acople*

c.2. Acople del sistema en calibración natural

El sistema de calibración en natural o luz solar se utiliza un acople, el cual servirá para la calibración. La cara superior del acople consta con un espacio donde se procede a colocar el yeso que nos sirve de referencia en blanco, la forma del acople es cuadrada que permita reflejar el sol como se muestra en la figura 46.

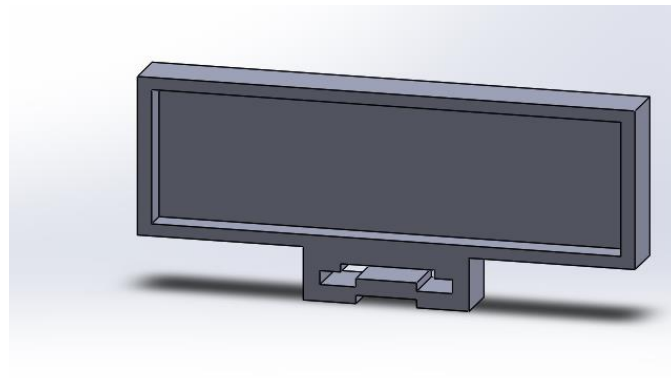


Figura 46 *Acople de luz*

3.9.4. Funcionamiento de la punta de muestra

La punta de muestreo es un mecanismo importante para el prototipo, el cual tiene la funcionalidad de reducir perturbaciones en la toma de datos del prototipo y trabajar en luz natural y artificial.

a. Funcionamiento con luz solar

Para la obtención de datos en luz solar se necesita que la punta de muestra este libre para que se pueda tener interacción con el sol y la muestra.

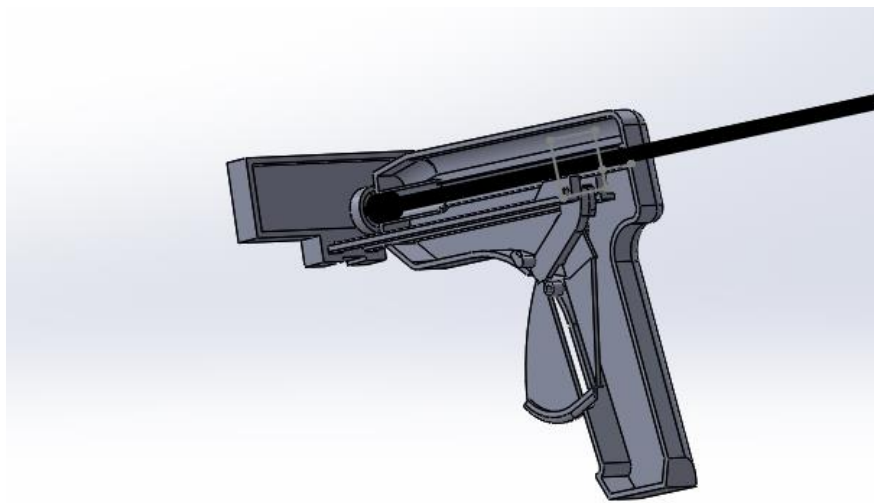


Figura 47 Puntas de prueba para luz solar

b. Funcionamiento con luz artificial

La luz artificial necesita un espacio herméticamente sellado, es decir que no exista perturbación del medio ambiente. De esta manera se obtiene datos más exactos de las muestras.

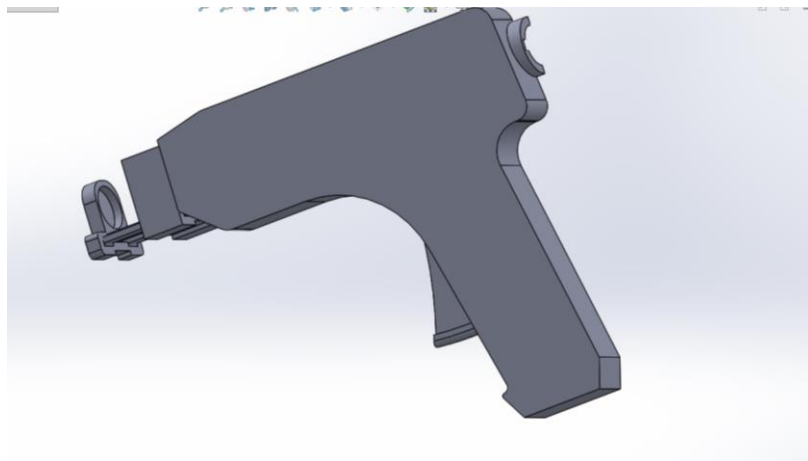


Figura 48 *Punta de prueba para luz artificial*

3.9.5. Diseño de la estructura del prototipo

El diseño dependerá de la colocación de los elementos del sistema, lo cual se toma en cuenta la dimensión de cada elemento, la facilidad de armar y desarmar el prototipo en el menor tiempo posible, el traslado y facilidad de uso. Por lo cual se realizó la siguiente estructura como se muestra en la figura 36

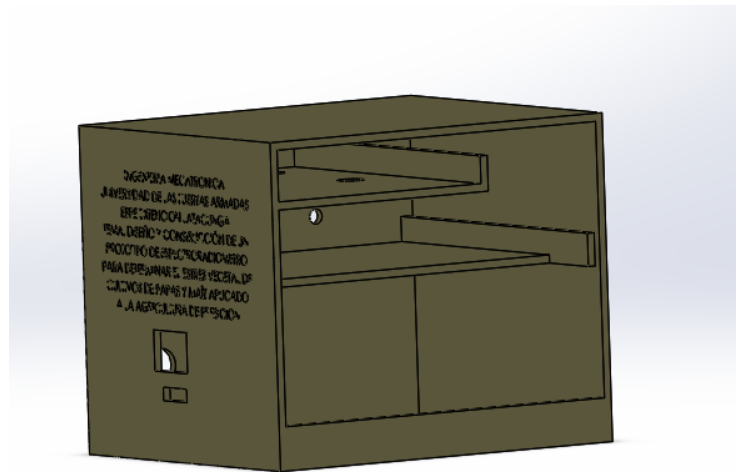


Figura 49 Carcasa del prototipo

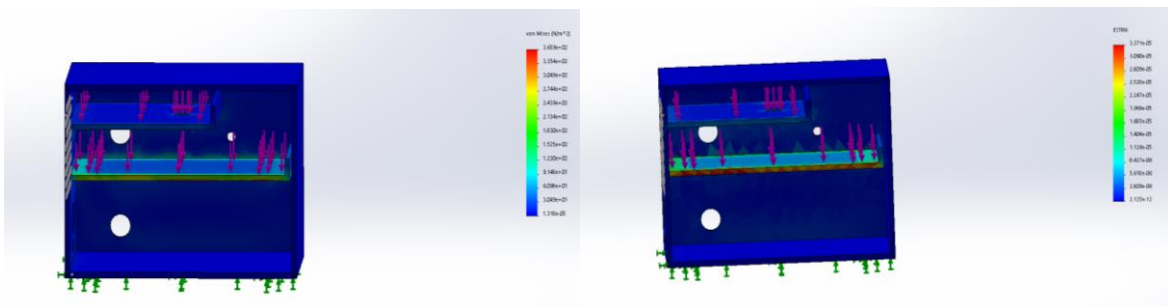


Figura 50 Análisis de esfuerzo de la caja del prototipo

Para el diseño final de la estructura se dividió en tres secciones donde contenerla al sensor, la tarjeta raspberry pi 3, el sistema de iluminación y las baterías. Tomando en cuenta las diferentes perforaciones para el sensor la carga de baterías y el encendido del sistema de iluminación como se muestra en la figura 49

En el análisis de esfuerzos se toma una carga en el compartimiento del espectrómetro el cual lleva una deformación en su estante.

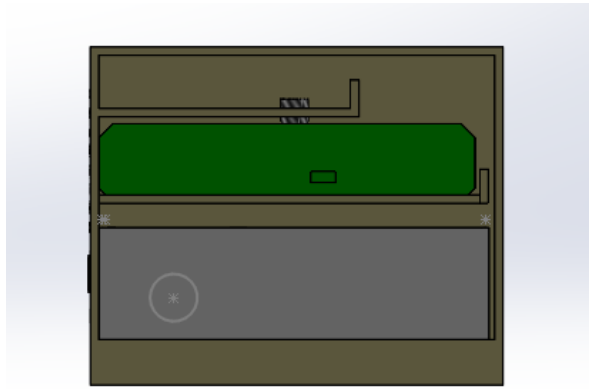


Figura 51 *Vista trasera de la estructura del ensamblado final*

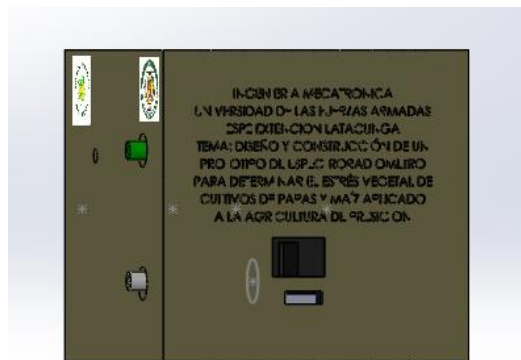


Figura 52 *Vista lateral del ensamblado final*

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA LA ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS DEL PROTOTIPO

En el siguiente capítulo se detalla la implementación del prototipo del espectroradiómetro, la parte física y el desarrollo de una aplicación para la visualización y adquisición de los espectros obtenidos de las muestras cumplimiento con el objetivo propuesto.

El sistema eléctrico es el componente encargado de realizar la conexión eléctrica del prototipo, para lo cual se toma en cuenta la versatilidad del equipo.

Tomando en cuenta las diferentes conexiones que se debe realizar, para la energización del prototipo y manipulación de los diferentes elementos, se desarrolla los siguientes módulos eléctrico del equipo detallado en la siguiente figura:

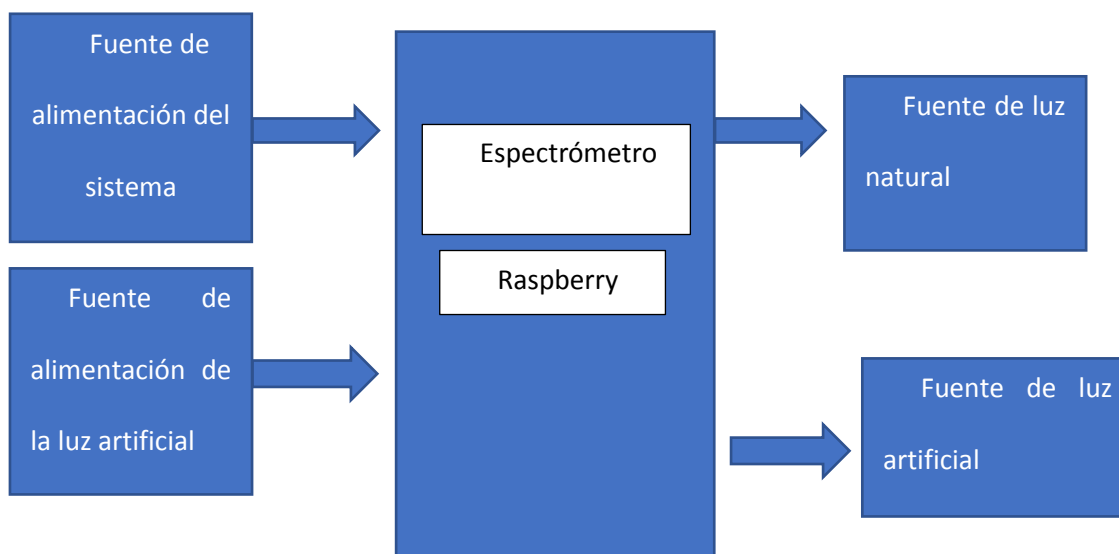


Figura 53 *Modulo del sistema eléctrico del equipo*

En la figura 53 se observa los elementos que forman parte para la conexión del funcionamiento del prototipo de espectroradiómetro, para lo cual se toma en cuenta el uso de cada componente eléctrico.

4.1. Implementación del sistema eléctrico

Se implementó las conexiones necesarias para integrar todo el sistema del prototipo de espectroradiómetro, el sensor, fuente de alimentación, luz artificial, estructura y tarjeta de procesamiento como se muestra en el diagrama de conexiones.

La toma de lectura del espectroradiómetro se da a través de la fibra óptica. El cual está acoplado al sensor y a su vez interconectado con una placa de adquisición raspberry pi 3, al mismo tiempo este módulo recibe los datos adquiridos por el sensor y envía los datos a la aplicación móvil el cual se transmite por comunicación bluetooth.

4.1.1. Diagrama eléctrico del Procesador

En la conexión de la fuente de energía del procesador, está constituido con la conexión y alimentación del espectrómetro. De esta manera se produce la comunicación entre el espectrómetro y la tarjeta de procesamiento la cual transmite los datos en comunicación bluetooth.

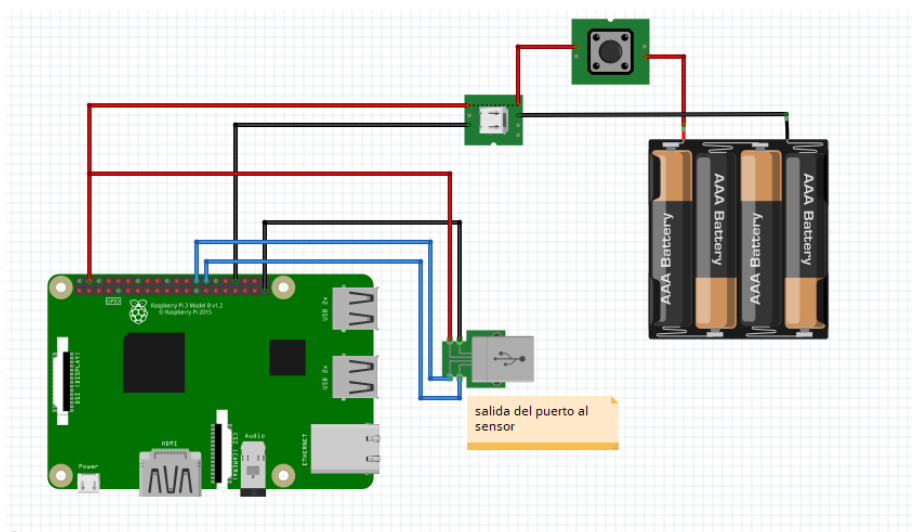


Figura 54 Diagrama de conexión del procesador

4.1.2. Diagrama eléctrico del sistema de luz artificial

En el diagrama eléctrico de la luz artificial consta de una fuente de alimentación independiente de esta manera se evita la pérdida de iluminación por falta de energía. La conexión tiene una batería de Lipo con su circuito de carga, un interruptor y su lámpara led.

Utilizando el contenedor diseñado, se realiza las conexiones de la lámpara led con la fuente de alimentación de 5V, creando un sistema hermético cerrado el cual evita la filtración de luz hacia el exterior obteniendo una mejor calibración del sensor en luz artificial.

4.2. Dependencia para el desarrollo del programa

En la dependencia del programa se comprueba la correcta manipulación de diversas librerías que ayuden con la comunicación y transmisión de datos por comunicación bluetooth.

A continuación se explica cada uno de sus procesos y comandos.

a) Instalación de Python

Se procede a verificar o instalar Python en el sistema operativo tomando en cuenta que este el complemento de Python PIP que es la que se necesita en el administrador para realizar la comunicación y poder instalar otras librerías necesarias.

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo apt-get install python2.7
Leyendo lista de paquetes... Hecho
Creando árbol de dependencias
Leyendo la información de estado... Hecho
python2.7 ya está en su versión más reciente (2.7.13-2+deb9u2).
0 actualizados, 0 nuevos se instalarán, 0 para eliminar y 1 no actualizados.
```

Figura 55 Comando de instalación.

A través del comando `sudo apt – get install Python` se procede a verificar la instalación de la librería más reciente que se encuentra disponible en la web.

b) Instalación de las librerías pyusb

Esta librería permite obtener una plataforma con Python para crear un excelente entorno para programación con terminales USB y además esta herramienta cede acceso a la librería fuente libusb.

```
pi@raspberrypi:~ $ pip install pyusb
```

Figura 56 *Instalación de librerías Pyusb*

c) Instalación de las librerías libusb

Esta librería contiene algunos ficheros que son los que permiten acceder a los dispositivos USB, se instala con el siguiente comando mostrado en la figura.

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo apt-get install libusb-1.0-0-dev
```

Figura 57 *Comando de instalación de librerías libusb*

4.3. Comprobación de drives en Linux

Por medio de la consola se verifica si los drivers están correctamente instalados para que funcione correctamente en la plataforma Linux.

```
pi@raspberrypi:~ $ cd ../Tesis
pi@raspberrypi:~/Tesis $ sudo python stellarnet.py info
--- Device Information
idVendor:      0BD7
idProduct:     A012
iManufacturer: 'StellarNet'
iProduct:      'USB2EPP'
--- Stored Strings:
00 'Ⓜ'
20 'GREEN-Wave VIS-50 #18032029'
40 ' '
60 ' '
80 '0.6944800000000000 1'
A0 '0.0001238000000 0'
C0 '337.990'
E0 '0.0000000000000000 4'
pi@raspberrypi:~/Tesis $
```

Figura 58 *Comprobación de equipo conectado*

A través del comando sudo Python stellarnet.py info se verifica las características del sensor donde se obtiene el id del sensor tanto del servicio como del producto.

4.4. Comprobación del espectrómetro

Una vez instalada el sistema operativo Linux en la raspberry Pi 3 y comprobado el correcto funcionamiento de sus drives se procede a verificar la comunicación y captación de datos del sensor.

```
Traceback (most recent call last):
  File "test.py", line 4, in <module>
    devices = stellarnet.find_devices()
NameError: name 'stellarnet' is not defined
pi@raspberrypi:~/Tesis $ sudo python test.py
(1737, 1755, 1762, 1752, 1724, 1760, 1788, 1791, 1798, 1784, 1768, 1768, 1775, 1
753, 1737, 1758, 1776, 1773, 1797, 1788, 1775, 1781, 1775, 1767, 1781, 1800, 177
5, 1771, 1796, 1767, 1778, 1783, 1751, 1793, 1800, 1799, 1791, 1789, 1772, 1752,
1752, 1774, 1767, 1777, 1790, 1794, 1792, 1781, 1763, 1747, 1765, 1785, 1803, 1
775, 1741, 1743, 1771, 1810, 1813, 1802, 1793, 1799, 1784, 1765, 1774, 1782, 177
5, 1768, 1761, 1743, 1747, 1768, 1784, 1791, 1769, 1751, 1755, 1761, 1755, 1758,
1770, 1777, 1784, 1776, 1751, 1734, 1738, 1752, 1750, 1770, 1770, 1768, 1790, 1
807, 1808, 1806, 1789, 1775, 1787, 1811, 1820, 1787, 1770, 1788, 1773, 1765, 177
2, 1785, 1786, 1799, 1818, 1825, 1794, 1746, 1763, 1787, 1770, 1790, 1793, 1776,
1751, 1746, 1764, 1766, 1796, 1821, 1794, 1794, 1797, 1795, 1775, 1750, 1760, 1
761, 1730, 1716, 1738, 1753, 1742, 1772, 1816, 1791, 1778, 1768, 1773, 1776, 177
6, 1780, 1782, 1763, 1736, 1719, 1749, 1788, 1799, 1773, 1750, 1792, 1813, 1792,
1770, 1768, 1775, 1754, 1755, 1768, 1766, 1764, 1760, 1767, 1762, 1751, 1752, 1
782, 1783, 1735, 1708, 1740, 1770, 1766, 1759, 1773, 1761, 1758, 1783, 1793, 178
7, 1776, 1771, 1756, 1730, 1738, 1762, 1784, 1805, 1792, 1801, 1811, 1788, 1779,
1764, 1768, 1771, 1760, 1765, 1769, 1754, 1746, 1768, 1783, 1762, 1766, 1764, 1
783, 1773, 1756, 1789, 1818, 1832, 1814, 1772, 1769, 1796, 1793, 1774, 1773, 176
6, 1760, 1751, 1760, 1773, 1763, 1777, 1787, 1773, 1760, 1758, 1761, 1773, 1776,
1758, 1746, 1747, 1773, 1814, 1814, 1761, 1723, 1740, 1754, 1748, 1765, 1748, 1
781, 1792, 1763, 1753, 1766, 1789, 1770, 1754, 1761, 1741, 1743, 1783, 1792, 180
1, 1803, 1801, 1825, 1793, 1743, 1721, 1747, 1771, 1770, 1762, 1757, 1781, 1808,
1826, 1813, 1805, 1790, 1797, 1803, 1777, 1778, 1775, 1767, 1778, 1778, 1767, 1
792, 1780, 1757, 1784, 1811, 1806, 1774, 1773, 1764, 1773, 1760, 1747, 1769, 179
0, 1809, 1798, 1797, 1748, 1718, 1730, 1744, 1756, 1734, 1705, 1729, 1748, 1761,
1791, 1813, 1808, 1789, 1739, 1756, 1802, 1803, 1780, 1754, 1763, 1779, 1780, 1
784, 1782, 1766, 1783, 1811, 1770, 1722, 1753, 1768, 1757, 1752, 1756, 1756, 173
6, 1743, 1748, 1753, 1753, 1748, 1760, 1767, 1760, 1759, 1749, 1755, 1794, 1778,
1761, 1798, 1804, 1766, 1756, 1766, 1761, 1779, 1782, 1756, 1752, 1749, 1766, 1
746, 1749, 1791, 1781, 1760, 1792, 1817, 1805, 1811, 1812, 1772, 1753, 1757, 175
6, 1771, 1782, 1767, 1749, 1743, 1779, 1786, 1775, 1792, 1770, 1768, 1781, 1736,
1721, 1777, 1781, 1794, 1792, 1770, 1755, 1763, 1814, 1807, 1754, 1768, 1759, 1
```

Figura 59 Comprobación del sensor

En la figura anterior se observa la captación de los datos del sensor verificando el funcionamiento del mismo.

4.5. Diseño de la interfaz

Comprobado el correcto funcionamiento del sensor para el prototipo de espectroradiómetro en el sistema operativo Linux se realiza una interfaz versátil para el usuario.

Para la comunicación vía Bluetooth es entre una raspberry Pi 3 y un celular. En este caso se debe tener en cuenta que se necesita Androide estudio IDE para el desarrollo del a aplicación.

4.5.1. Configuración de la Raspberry Pi 3

1. Se conecta y se actualiza los paquetes de Raspberry PI 3.

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo apt-get update && sudo apt-get upgrade
Des:1 http://archive.raspberrypi.org/debian stretch InRelease [25,3 kB]
Des:2 http://raspbian.raspberrypi.org/raspbian stretch InRelease [15,0 kB]
Des:3 http://raspbian.raspberrypi.org/raspbian stretch/main armhf Packages [11,7
MB]
Des:4 http://archive.raspberrypi.org/debian stretch/main armhf Packages [174 kB]
Des:5 http://archive.raspberrypi.org/debian stretch/ui armhf Packages [34,3 kB]
22% [3 Packages 194 kB/11,7 MB 2%] 25,1 kB/s 7min 36s
```

Figura 60 Actualización de paquetes

2. Después en las bibliotecas de desarrollo deben estar Python y bluetooth con los siguientes comandos.

```

pi@raspberrypi:~ $ sudo apt-get install python-dev libbluetooth-dev
Leyendo lista de paquetes... Hecho
Creando árbol de dependencias
Leyendo la información de estado... Hecho
python-dev ya está en su versión más reciente (2.7.13-2).
libbluetooth-dev ya está en su versión más reciente (5.43-2+rpt2+deb9u2).
0 actualizados, 0 nuevos se instalarán, 0 para eliminar y 1 no actualizados.
pi@raspberrypi:~ $ █

```

Figura 61 *Instalación de paquete de bluetooth*

- Utilizando PIP el administrador de Python se instala Pybluez con el siguiente comando.

```

pi@raspberrypi:~ $ sudo pip install pybluez
Looking in indexes: https://pypi.org/simple, https://www.piwheels.org/simple
Requirement already satisfied: pybluez in /usr/local/lib/python2.7/dist-packages
(0.22)

```

Figura 62 *Instalación Pybluez*

- Para que funcione no solo se debe cargar el bluetooth Python sino también configurar el bluetooth Daemon debido al periférico del puerto serial y añadir a los archivos del servidor en el inicio con los siguientes parámetros.

```

pi@raspberrypi:~ $ sudo nano /etc/systemd/system/dbus-org.bluez.service

```

Figura 63 *Configuración del bluetooth*

- En la línea a continuación se debe agregar un `-C` en la palabra bluetooth.

```

[Unit]
Description=Bluetooth service
Documentation=man:bluetoothd(8)
ConditionPathIsDirectory=/sys/class/bluetooth

[Service]
Type=dbus
BusName=org.bluez
ExecStart=/usr/lib/bluetooth/bluetoothd -C
NotifyAccess=main
#WatchdogSec=10
#Restart=on-failure
CapabilityBoundingSet=CAP_NET_ADMIN CAP_NET_BIND_SERVICE
LimitNPROC=1
ProtectHome=true
ProtectSystem=full

[Install]
WantedBy=bluetooth.target
Alias=dbus-org.bluez.service

```

[20 líneas leídas]

^G Ver ayuda ^O Guardar ^W Buscar ^K Cortar txt ^J Justificar ^C Posición
^X Salir ^R Leer fich. ^\ Reemplazar ^U Pegar txt ^T Ortografía ^_ Ir a línea

Figura 64 Comprobación de inflaciones de paquetes

6. Carga de nuevo las configuraciones y después se reinicia el bluetooth con los comandos que se mostraran a continuación.

```

pi@raspberrypi:~ $ sudo systemctl daemon-reload
pi@raspberrypi:~ $ sudo sytemctl restart dbus-org.bluez.service

```

Figura 65 Comando de reinicio del bluetooth

7. Ahora se puede cargar el perfil del puerto serial y se obtiene un mensaje que confirma que el registro del puerto serial está completo.

```
pi@raspberrypi:~$ sudo sdptool add SP
Serial Port service registered
```

Figura 66 Registro del puerto serial

4.5.2. Código del servicio de bluetooth

En la función principal en la raspberry pi por medio de las primeras líneas se crea un nuevo socket bluetooth utilizando protocolo (RFCOM) vinculando a cualquier puerto disponible.

```
# Create a new server socket using RFCOMM protocol
server_sock = BluetoothSocket(RFCOMM)
# Bind to any port
server_sock.bind(("", PORT_ANY))
# Start listening
server_sock.listen(1)
```

Figura 67 Vinculación de puertos bluetooth

```
# The service UUID to advertise
uuid = "7belfcb3-5776-42fb-91fd-2ee7b5bbb86d"

# Start advertising the service
advertise_service(server_sock, "RaspiBtSrv",
                  service_id=uuid,
                  service_classes=[uuid, SERIAL_PORT_CLASS],
                  profiles=[SERIAL_PORT_PROFILE])
|
```

Figura 68 Comunicación del servidor con la aplicación androide

Después se guarda la instancia del dispositivo conectado

```
devices = stellarnet.find_devices()
```

Ahora se crea un bucle del servicio aceptando conexiones de celulares vía bluetooth y enviando constantemente los datos del espectrómetro.

```

while True:
    print "Waiting for connection on RFCOMM channel %d" % port

    try:
        client_sock = None

        # Aceptar la conexión del cliente
        # This will block until we get a new connection
        client_sock, client_info = server_sock.accept()
        print "Accepted connection from ", client_info

        # Mientras el cliente este conectado envío datos
        while client_sock is not None:

            # Se envía el espectrometro captado por el dispositivo conectado
            # Send the spectrum to the device connected
            msg = str(devices[0].read_spectrum())
            client_sock.send(msg)

            # Se duerme el hilo por medio segundo
            time.sleep(0.5)

        # Omitir excepciones de entrada y salida
    except IOError:
        pass

    # Apagar servicio en caso de interrupción por teclado
    except KeyboardInterrupt:

        if client_sock is not None:
            client_sock.close()

        server_sock.close()

        print "Server going down"
        break

main()

```

Figura 69 *códigos de comunicación*

4.6. Implementación de la interfaz

La interfaz diseñada cuenta de una pantalla de selección que consta de los siguientes modos de trabajo dependiendo las condiciones del muestreo.

- Luz natural en este modo el muestreo es realizado con la luz solar y su calibración es a luz solar.

Luz artificial en este modo el muestreo es realizado con luz artificial por medio de Se debe crear un identificador único para el servidor que ayuda a identificar y privatizar el servicio utilizando la aplicación Androide para poder comunicarse.

- un espacio cerrado que evite perturbaciones y una lámpara led de alta luminosidad.
- El modo historia permite visualizar las gráficas y datos de las muestras previamente guardadas de una forma versátil para su comparación.

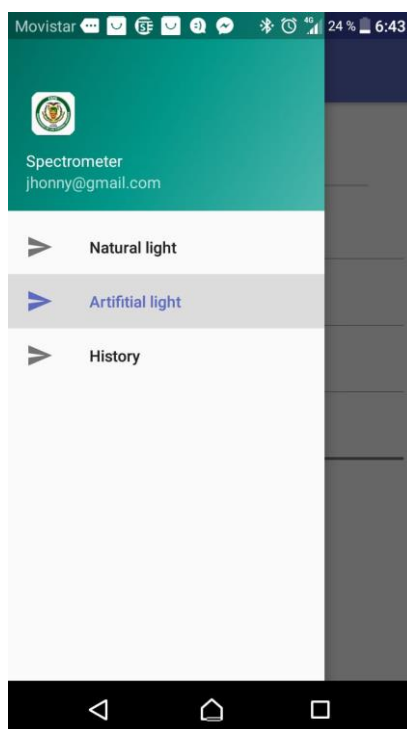


Figura 70 *Pantalla de selección del modo de trabajo.*

En la figura se observa la pantalla que se despliega para la selección del tipo de modo de trabajo para la interfaz y para poder visualizar las gráficas guardadas.

Después de seleccionar el modo de trabajo se despliega una pantalla en la cual se calibra la intensidad de reflectancia al 100%.

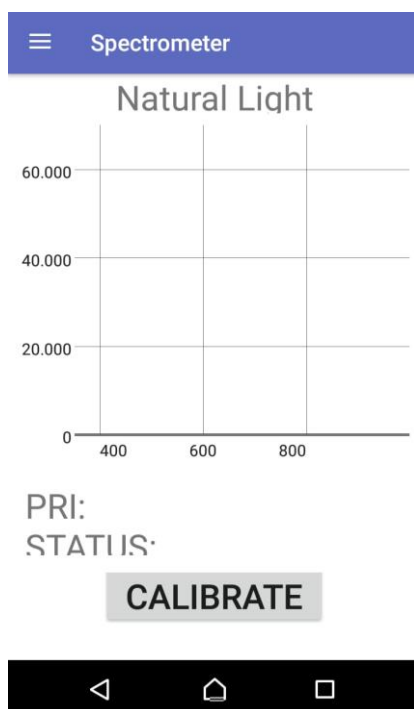


Figura 71 *Pantalla de calibración de reflectancia luz al 100%*

En la figura 71 se observa la pantalla en la cual se calibra la luz de reflectancia al 100 % tomando en cuenta su número de integraciones para evitar atenuación en la gráfica. El botón calíbrate realiza el proceso de guardar los datos de reforestación de luz al 100%. Este proceso se realiza en los dos modos de trabajo para la correcta toma de muestras para evitar perturbaciones de luz dependientes de las condiciones climatológicas.



Figura 72 Pantalla para visualizar la reflectancia vs longitud de onda electromagnética.

En la figura 72 se visualiza la pantalla de reflectancia vs longitud de onda electromagnética enfocado en el índice de vegetación PRI de rango 530 -570 nm. Con el rango del PRI se relaciona los puntos de reflectancia para calcular su porcentaje de incidencia visualizada en la pantalla y el estado de la planta (status).

Los botón reset permite resetear la calibración de esta manera se obtendrá datos más precisos con diversas condiciones de luminosidad en el caso de luz natural.

El botón save permite guardar los datos de la muestra creando una imagen en la historia de la aplicación y automáticamente se guarda en una hoja de cálculo Excel archivado en la memoria del dispositivo Androide.

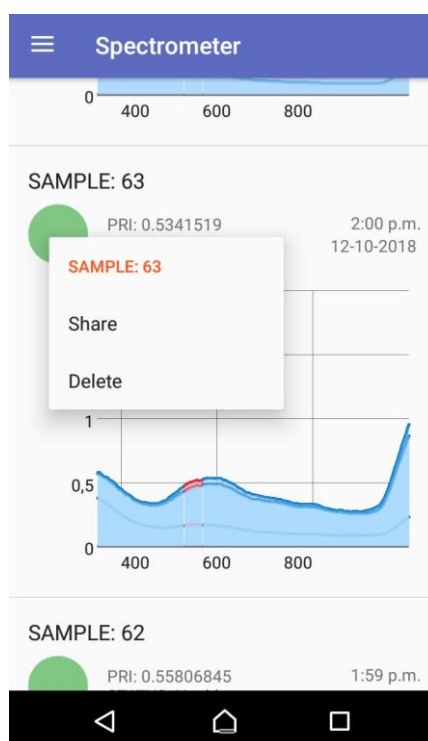


Figura 73 *Pantalla de la historia de la aplicación*

En la figura 73 se observa la pantalla de la historia de la aplicación donde se puede visualizar las muestras guardadas y relacionar las curvaturas de diferentes muestras.

En la pantalla se visualiza el número del ejemplo de la muestra guardada, su valor PRI, hora y fecha de creación del archivo. En el botón ubicado al lado superior izquierdo de la gráfica permite compartir los datos con otros usuarios y eliminar los datos guardados.

| | |
|---------------------------------|------------------|
| SAMPLE: , 12 | 544 , 0.28197956 |
| PRI: , 0.59486973 | 545 , 0.28301886 |
| STATUS: , Healthy | 546 , 0.2839741 |
| DATE: , 11:15 a.m. , 11-30-2018 | 547 , 0.2846094 |
| | 548 , 0.2847584 |
| DATAS: | 549 , 0.285694 |
| | 550 , 0.28655314 |
| X , Y | 551 , 0.28700656 |
| 0 , 0.9952545 | 552 , 0.28758407 |
| 1 , 0.99565405 | 553 , 0.28863204 |
| 2 , 0.9886957 | 554 , 0.28939185 |
| 3 , 0.9908457 | 555 , 0.28990123 |
| 4 , 0.9925634 | 556 , 0.2909833 |
| 5 , 0.9943182 | 557 , 0.29159853 |
| 6 , 0.99167764 | 558 , 0.29222935 |
| 7 , 0.9916703 | 559 , 0.29273272 |
| 8 , 0.9908377 | 560 , 0.2930248 |
| 9 , 0.9895652 | 561 , 0.2947408 |
| 10 , 0.98957425 | 562 , 0.29614717 |
| 11 , 0.99090517 | 563 , 0.29777148 |
| 12 , 0.99347824 | 564 , 0.29791233 |
| 13 , 1.0004369 | 565 , 0.297783 |
| 14 , 1.0039682 | 566 , 0.29859325 |

Figura 74 Firmas espectrales del prototipo

En la figura 74 se observa los datos guardados en la memoria del dispositivo Android creados en una hoja de calculo Excel con su hora, fecha y numero de muestra.

4.7. Implementación del sistema de iluminación.

Para el sistema de iluminación se toma en cuenta el espacio que debe tener la batería, la led luz, el módulo de carga que servirá para la recarga del mismo y el respectivo cableado del sistema tomando como se muestra en la figura 33

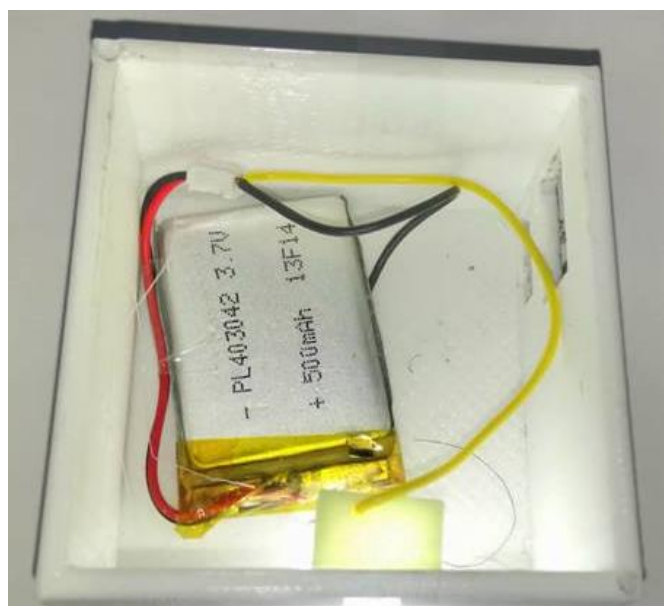


Figura 75 *Implantación del sistema*

4.7.1 Cargador de la batería

El cargador de la batería está implementado por un módulo de carga USB, el cual se encarga de regular el voltaje de ingreso de la batería, evitando variación de corriente la cual daña a la batería.

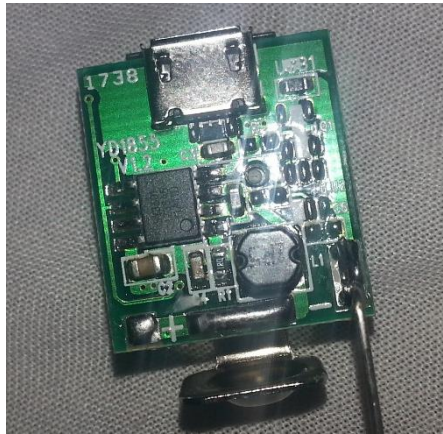


Figura 76 *módulo de carga*

4.7.2 Batería

La batería se conectara en el pin positivo y negativo respectivamente del módulo cargador de batería, a su vez se conectara en paralelo un interruptor, el cual suministrara energía al sistema de iluminación mientras la batería se esté cargando.

Para el desarrollo del prototipo se utiliza una batería tipo Li-po, por las características previamente calculadas como se observa en la tabla 9, la razón que se escogió este tipo de batería es por su poco espacio que ocupa en el sistema y la facilidad de carga del mismo, atreves de un módulo de carga existente en el mercado por medio de puerto USB estándar.

Este tipo de baterías es muy utilizados en drones, presentando un excelente rendimiento cuando exige una gran demanda de corriente y duración del tiempo de uso, en este tipo de aplicaciones es necesario una batería con alto rendimiento de energía y alta duración de uso, que se pueda recargar fácilmente vía puerto USB, siendo el tipo de entrada el más utilizado en el mercado.



Figura 77 Batería de li- Po 500 mAH a 3.7 v

4.7.3 Luz led

La luz led es un componente electrónico el cual requiere un voltaje de 3,7 voltios como se muestra en la tabla 8 de características, posee dos pines el cual ira conectado a la batería y el otro pin al interruptor, el cual enciende al sistema de iluminación, transmitiendo por la fibra óptica la máxima reflectancia de la luz led que se encuentra en un rango de 350 a 1000 nm para la obtención de datos del espectroradiómetro.

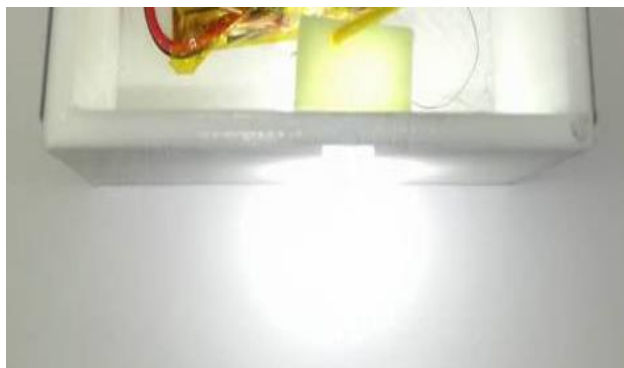


Figura 78 *luz led*

4.8. Implementación del espectroradiómetro

El diseño de la carcasa se tomó en cuenta cada elemento que va ingresar en el sistema, tomando en cuenta las dimensiones reales de cada elemento constituido en el sistema, el diseño se divide en tres secciones.



Figura 79 *Carcasa del sistema*

La primera ingresa la raspberry, siendo el compartimiento más pequeño por sus dimensiones, donde se toma en cuenta las diferentes conexiones del sistema como se muestra en la figura 66.



Figura 80 *Carcasa del sistema.*

El segundo compartimiento se coloca el sensor espectral, tomando en cuenta la salida de la fibra óptica por donde se obtiene los datos y el led de encendido del sensor.



Figura 81 *Compartimento dos del sistema*

El tercer compartimiento es para el sistema de iluminación y la batería de todo el sistema, para lo cual se toma en cuenta la salida del sistema de iluminación, como el encendido y carga del mismo como se muestra en la figura 40



Figura 82 tercer compartimiento

4.9. Implementación de la punta de prueba

La punta de prueba se tomó en cuenta la facilidad de traslado y sus diferentes funciones, para lo cual se realizó un mecanismo que sirva en luz artificial y luz natural, como se muestra en la figura 83



Figura 83 *Mecanismo de toma de datos*

El mecanismo está constituido por tres partes importantes, el resorte que permite el retorno de mecanismo después de la colocación de la muestra, el gatillo sirve para extender el mecanismo de su posición inicial, la parte móvil donde se coloca los diferentes acoples.

4.9.1 Carcasa izquierda

La carcasa izquierda contiene al mecanismo de la toma de datos, el cual es sujetado a través de tornillos con la misma, evitando posibles fallos en el mecanismo.



Figura 84 *carcasa izquierda*

4.9.2 Carcaza derecha

La carcaza derecha tapa al mecanismo y a la fibra óptica evitando movimiento en los componentes, para lo cual se sujeta con tornillos al redor de la carcaza



Figura 85 Cierre de la punta de muestra

4.9.3 Acoples del sistema artificial

El sistema artificial está constituido por dos acoples, los cuales permiten que no exista perturbación en el sistema al momento de la calibración, para los cual este sistema debe permaneces herméticamente cerrado como se muestra en la figura 44



Figura 86 Cierre de la punta de muestra

4.9.4 Sistema de luz solar

El sistema de luz solar necesita que el sol impacte directamente a la punta de muestra, se coloca un acople en el fin del mecanismo que refleja el sol y realizar su respectiva calibración.



Figura 87 sistema de luz solar

CAPÍTULO 5

PRUEBAS Y RESULTADOS

Este capítulo consta de dos partes principales, la validación del correcto funcionamiento del prototipo de espectroradiómetro, que a continuación son detalladas.

- Validación del sistema de interfaz desarrollado.
- Validación del prototipo de espectroradiómetro mediante el equipo fieldSpec4 proporcionado por el Instituto Especial Ecuatoriano.
- Pruebas de campo.

5.1. Validación del sistema de interfaz desarrollado.

En esta parte se procederá a calibrar y verificar el correcto funcionamiento del prototipo de espectroradiómetro, con el uso de un láser de trabajo rango de 530 nm proporcionado por la Escuela Politécnica Nacional.



Figura 88 Laser 532 nm Óptica Bank de la Escuela Politécnica Nacional.

En la figura 88 se observa el láser de 532 nm que funciona a 12 V y corriente de 1A. Mediante este laser se busca realizar la verificación del correcto funcionamiento del software desarrollado para el prototipo comparando con el software comercial del stellarnet. De esta manera se calibrará el prototipo espectroradiómetro.

5.1.1 Verificación mediante el Laser 532 nm

Para la validación de la aplicación del prototipo se procede con la verificación de su funcionamiento en un láser 532 nm establecido en la onda verde.



Figura 89 *Prueba de validación del prototipo de espectroradiómetro con el láser 532 nm en la Escuela Politécnica Nacional*

El láser 532 nm es un proyecto desarrollado por la Escuela Politécnica Nacional que se encuentran en el laboratorio de UAV y Aplicaciones Ópticas.

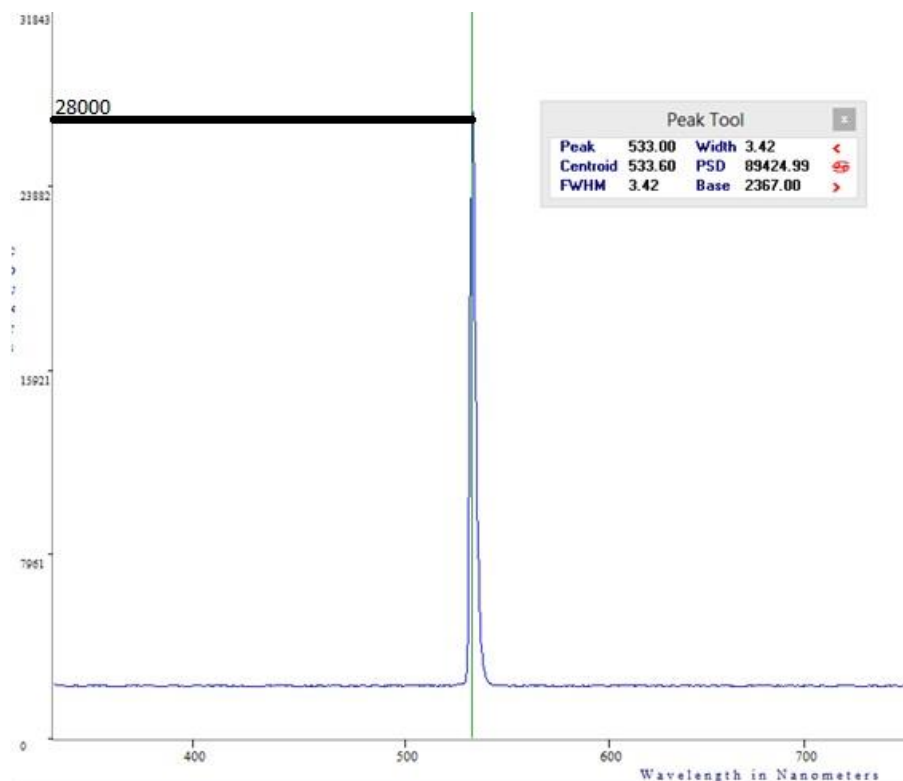


Figura 90 Muestra tomada del láser 532 nm mediante el software comercial del stellarnet

En la figura 90 se observa la muestra tomada del láser 532 nm por el programa comercial stellarnet que tiene un pico en 532 nm presente en el rango visible. Esto demuestra que el prototipo está calibrado y funcionando correctamente para la toma de muestras de plantas de maíz y papas que serán analizadas posteriormente.

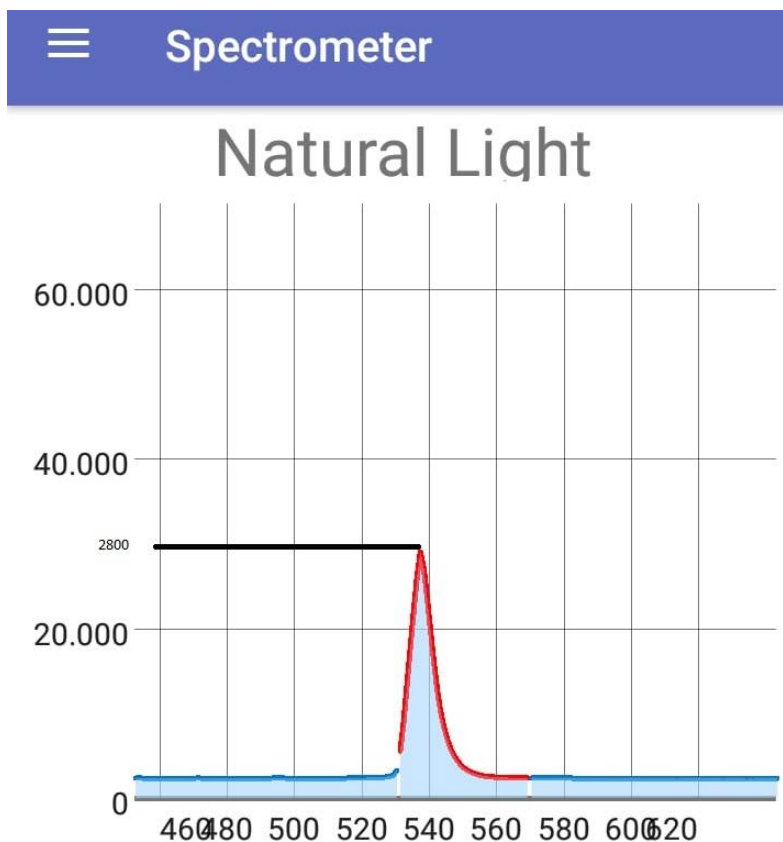


Figura 91 Muestra tomada del láser 532 nm mediante la interfaz desarrollada para el prototipo de espectroradiómetro

En la figura 91 se observa la muestra tomada del láser 532 nm por el programa de interfaz desarrollado en Androide Studio como aplicación móvil, que tiene un pico en 532 nm presente en el rango visible. De esta manera comprobando el correcto funcionamiento de la toma de datos de la aplicación móvil.

5.2. Validación mediante el Fieldspec 4 proporcionado por el Instituto Especial Ecuatoriano

Se realiza la prueba de funcionamiento del prototipo de espectroradiómetro mediante la comparación de resultados del equipo Fieldspec 4 que es un espectroradiómetro industrial de propiedad del Instituto Especial Ecuatoriano.

Utilizando la luz de tungsteno y la muestra en blanco se procede a la calibración el equipo Fieldspec 4.

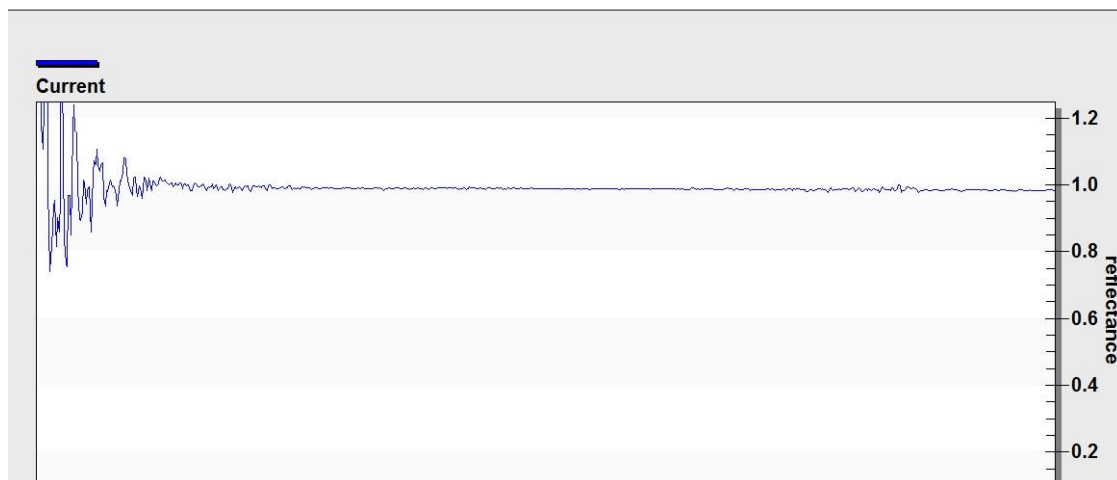


Figura 92 Calibración en blanco con luz de tungsteno del equipo Fieldspec 4

En la figura 92 se puede observar la gráfica de la visualización de la calibración del equipo Fieldspec 4 con una reflectaría aproximada a uno. Teniendo en cuenta que cuando la punta de la fibra óptica se apuntaba directamente a la luz se atenúa la señal.

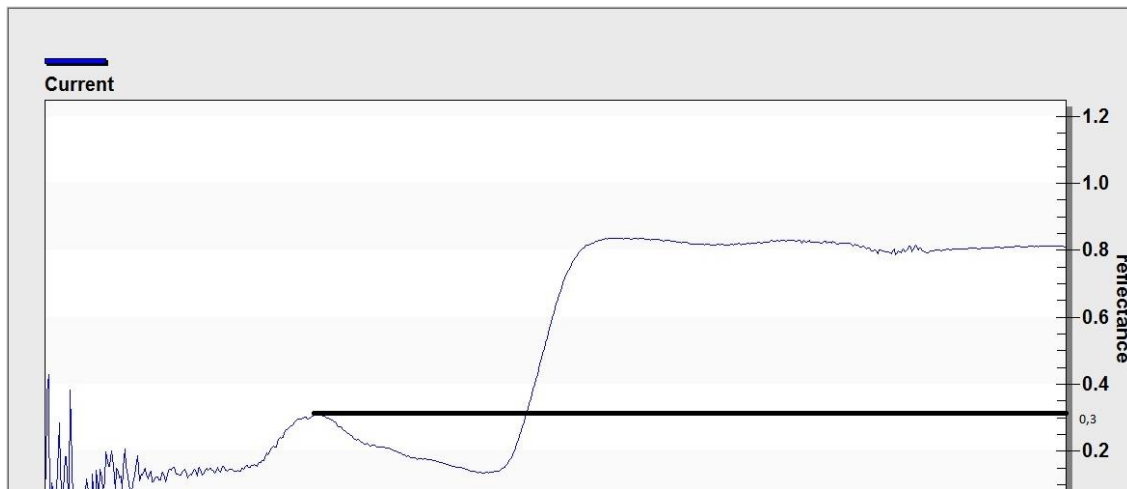


Figura 93 Muestra tomada mediante en espectroradiómetro Fieldspec 4 del Instituto Espacial Ecuatoriano

En la figura 93 se observa la muestra tomada con el Fieldspec 4 que está trabajando con los parámetros de iluminación de tungsteno y midiendo una plata de maíz en buen estado con un valor de reflectancia en el pico de la onda verde de 0.3 %.

Utilizando la luz de tungsteno y la muestra en blanco se procede a la calibración del prototipo de espectroradiómetro.

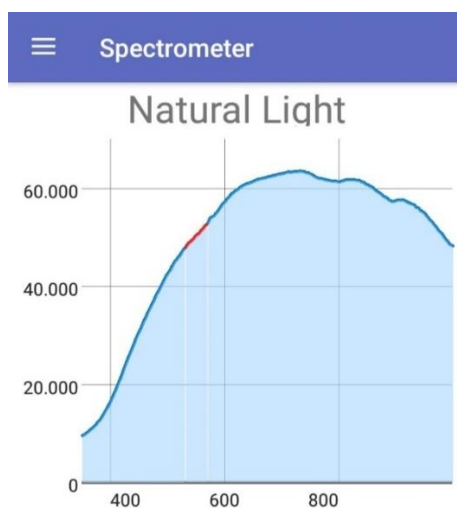


Figura 94 *Calibración en blanco con la luz de tungsteno del prototipo del proyecto*

En la figura 94 se puede observar por la aplicación desarrollada la gráfica de la muestra en blanco de referencia con la iluminación de tungsteno. De esta manera realiza su correcta calibración para la toma de muestras vegetales.

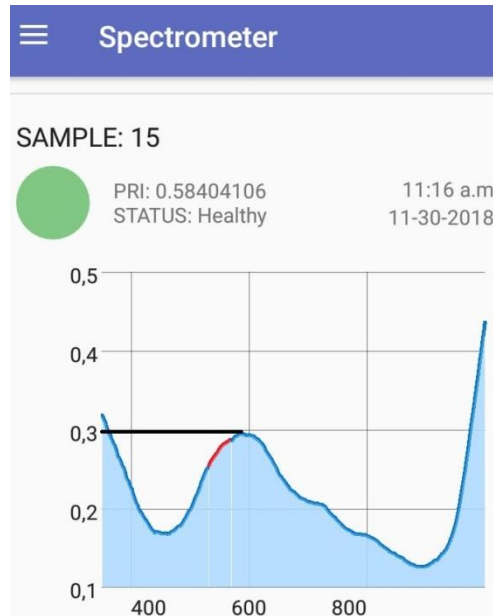


Figura 95 Muestra tomada mediante la interfaz del prototipo de espectroradiómetro desarrollado.

En la figura 95 se observa la muestra tomada con el prototipo de espectroradiómetro diseñado, en condiciones de trabajo de iluminación de tungsteno y midiendo una plata de maíz en buen estado con un valor de reflectancia en el pico de la onda verde de 0.3 %.

En conclusión se observó que la medición de la reflectancia de la muestra en este caso una plata de maíz en el pico de la onda verde tiene un valor de 0.3% comparando el equipo Fieldspec 4 del Instituto Espacial Ecuatoriano con el prototipo del proyecto.

5.3. Validación de pruebas en cultivos de maíz y papas

Para la validación y toma de datos en el campo de trabajo se realiza un muestreo de una población de cultivos de maíz y de papas con variable cualitativa de una población de una parcela de maíz y de papas con una confiabilidad de 95% y un error de 5%, sin estudios anteriores

Número de plantas de maíz sembradas en $10 m^2$

$N=25$ plantas (tamaño de la muestra)

$E= 0.05$ (limite aceptable del error muestra)

$Z= 1.96$ (nivel de confianza 95%)

$p=q=0,5$ (sin estudios anteriores)

$$n = \frac{N \cdot z^2 \cdot p \cdot q}{N \cdot E^2 + z^2 \cdot p \cdot q}$$

$$n = \frac{25 \cdot (1.96)^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{25 * 0,05^2 + (1.96)^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}$$

$$n = \frac{25 \cdot (1.96)^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{25 * 0,05^2 + (1.96)^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}$$

$$n = 23$$

La muestra de la población por validación estadística es de $n=23$ plantas de maíz y de papas en una área de trabajo de $10 m^2$, Analizando condiciones de cultivos con características de siembra similares como el mismo tiempo de sembrío, condiciones de nutrición y ubicación geométrica similares.

De esta forma se mide en los cultivo de maíz y de papas los índice de reflectancia fotoquímica (PRI) de las plantas.

Tabla 14

Tabla de datos de PRI de las muestras en plantas de maíz

| Numero de muestras | Valor de PRI en maíz en luz natural | Valor de PRI en maíz en luz artificial |
|-----------------------------------|--|---|
| 1 | 0,693 | 0,561 |
| 2 | 0,774 | 0,452 |
| 3 | 0,604 | 0,535 |
| 4 | 0,502 | 0,584 |
| 5 | 0,576 | 0,654 |
| 6 | 0,457 | 0,578 |
| 7 | 0,689 | 0,78 |
| 8 | 0,84 | 0,467 |
| 9 | 0,789 | 0,474 |
| 10 | 0,836 | 0,445 |
| 11 | 0,789 | 0,661 |
| 12 | 0,661 | 0,567 |
| 13 | 0,622 | 0,678 |
| 14 | 0,546 | 0,745 |
| 15 | 0,701 | 0,475 |
| 16 | 0,564 | 0,645 |
| 17 | 0,456 | 0,845 |
| 18 | 0,754 | 0,621 |
| 19 | 0,812 | 0,864 |
| 20 | 0,757 | 0,756 |
| 21 | 0,683 | 0,748 |
| 22 | 0,569 | 0,765 |
| 23 | 0,457 | 0,842 |
| Valor medio de PRI | 0,657869565 | 0,640956522 |
| Desviación estándar de PRI | 0,122681385 | 0,130962151 |

En la tabla 14 se detalla cada uno de los valores de reflectancia fotoquímica (PRI), obtenidas en una plantación de maíz ubicada en el cantón salcedo. Para lo cual se escogió aleatoriamente 23 plantas del cultivo, obteniendo un promedio de la reflectancia fotoquímica (PRI) en luz natural de 0.6578 y luz artificial de 0.6409.

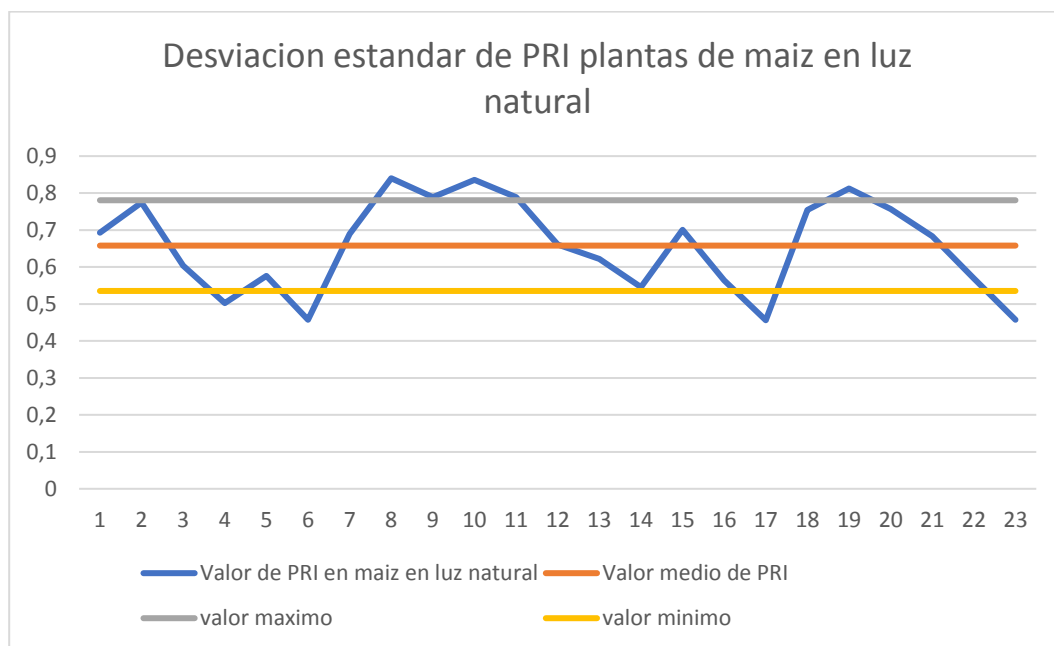


Figura96. Diagrama de valores de reflectancia fotoquímica (PRI) en luz natural en plantas de Maíz.

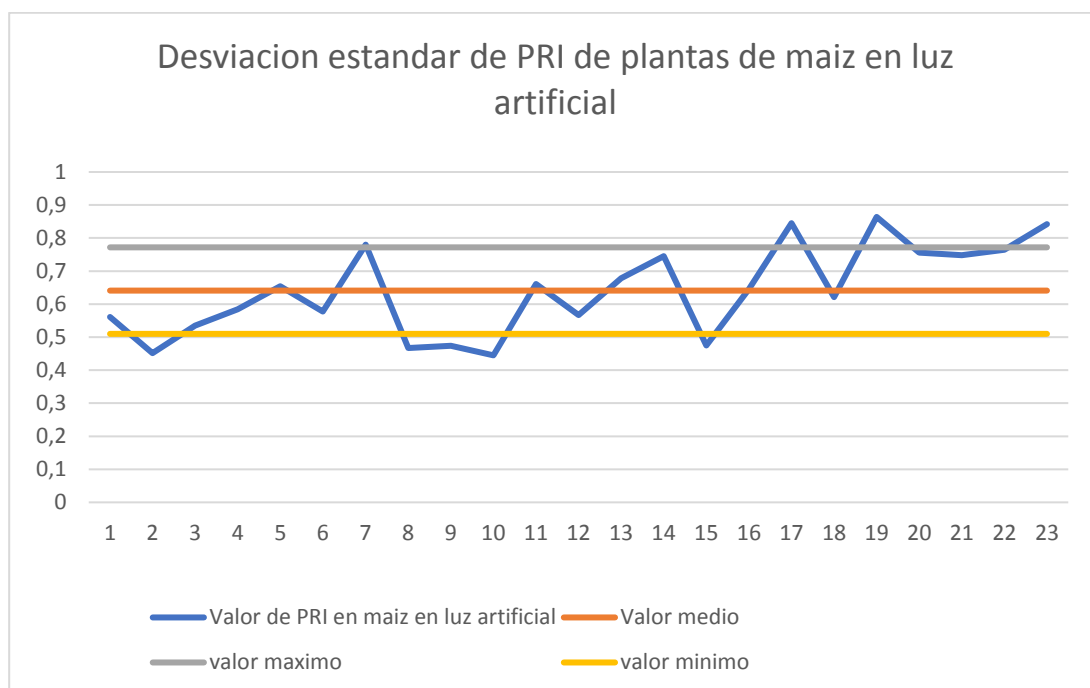


Figura97. Diagrama de valores de reflectancia fotoquímica de (PRI) en luz artificial en plantas de Maíz.

Tabla 15

Tabla de datos del PRI de las muestras en plantas de papas

| Numero de muestras | Valor de PRI de papas en luz natural | Valor de PRI de papas en luz artificial |
|--------------------|--------------------------------------|---|
| 1 | 0,996 | 0,897 |
| 2 | 1,23 | 0,753 |
| 3 | 0,956 | 0,789 |
| 4 | 0,768 | 0,859 |
| 5 | 1,018 | 0,789 |
| 6 | 0,956 | 0,689 |
| 7 | 1,044 | 0,812 |
| 8 | 0,923 | 0,894 |
| 9 | 0,937 | 1,012 |
| 10 | 1,128 | 0,985 |
| 11 | 0,654 | 0,968 |
| 12 | 0,784 | 0,879 |

CONTÍNUA



| | | |
|-----------------------------------|-------------|-------------|
| 13 | 0,789 | 0,785 |
| 14 | 0,802 | 0,963 |
| 15 | 0,954 | 0,945 |
| 16 | 0,678 | 0,985 |
| 17 | 0,921 | 0,695 |
| 18 | 0,784 | 0,756 |
| 19 | 0,687 | 0,794 |
| 20 | 0,856 | 0,946 |
| 21 | 0,687 | 0,854 |
| 22 | 0,764 | 0,789 |
| 23 | 0,718 | 0,901 |
| Valor medio de PRI | 0,871043478 | 0,858217391 |
| Desviación estándar de PRI | 0,149979268 | 0,09369653 |

En la tabla 15 se detalla cada uno de los valores de reflectancia fotoquímica (PRI), obtenidas en una plantación de papas ubicada en el cantón salcedo. Para lo cual se escogió aleatoriamente 23 plantas del cultivo, obteniendo un promedio de la reflectancia fotoquímica (PRI) en luz natural de 0.8710 y luz artificial de 0.8582.

Comparando los valores de promedios de PRI de las plantas de maíz con las de papas se puede diferenciar que el grado de PRI del cultivo de papas es mucho mayor que el de maíz, debido a las características de absorción hídrica de cada cultivo.

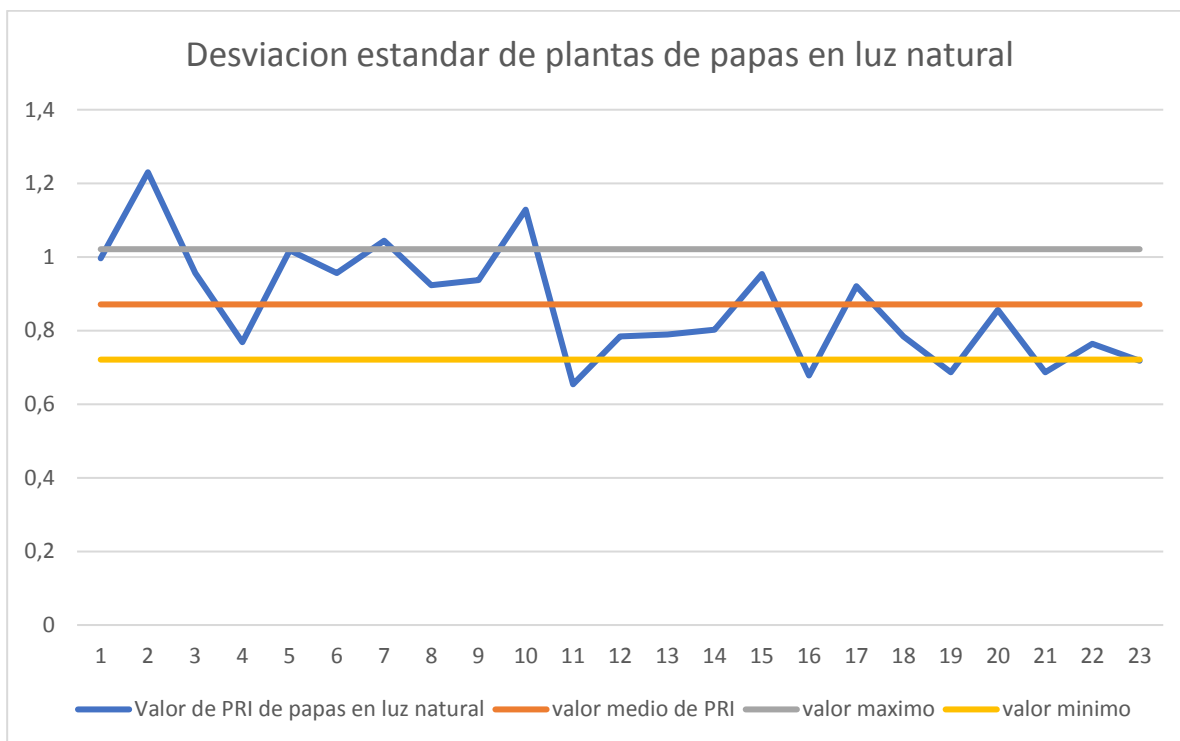


Figura 98 Diagrama de valores de reflectancia fotoquímica (PRI) en luz natural en plantas de papas.

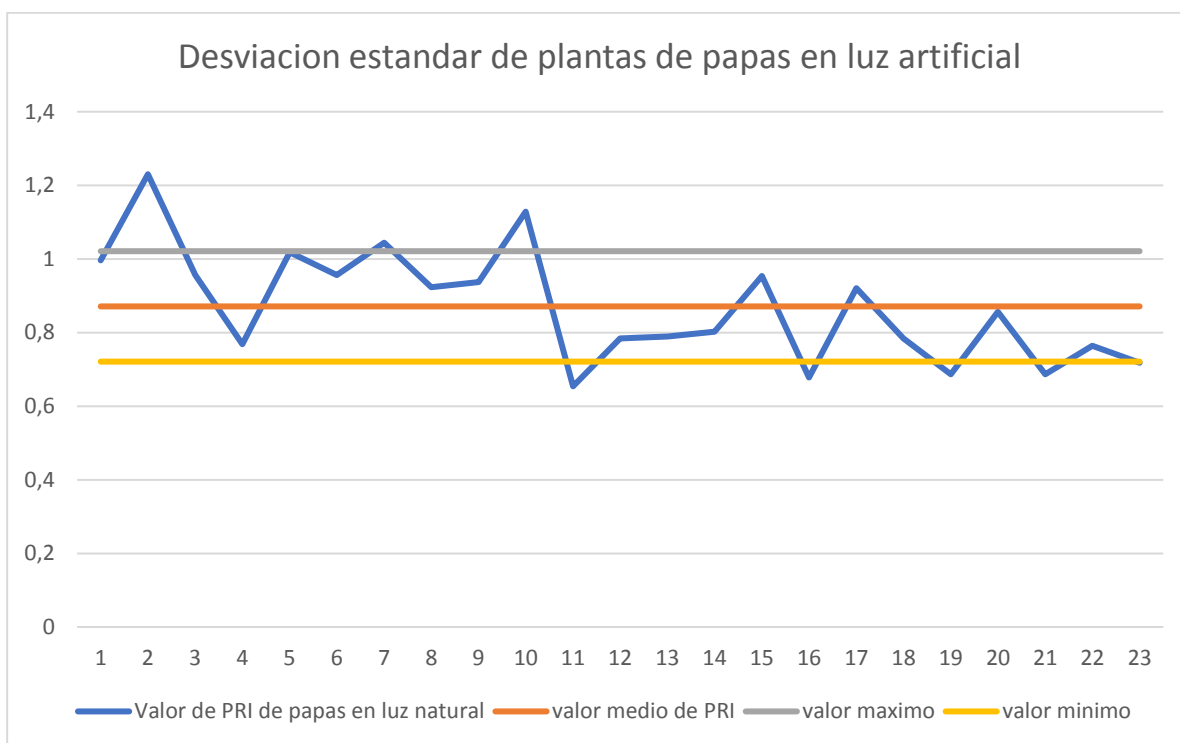


Figura 99 *Diagrama de valores de reflectancia fotoquímica (PRI) en luz artificial en plantas de papas.*

Al final se realiza un promedio de los valores de reflectancia fotoquímica (PRI) de las muestras analizadas. Determinando el estrés hídrico de las plantas, cumpliendo con la hipótesis planteada en el proyecto.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- El diseño construido permite tener una versatilidad de trabajo, permitiendo que funcione con luz natural y artificial, evitando lecturas erróneas en el sistema, además es de fácil traslado en el campo.
- Se logró implementar un algoritmo de control, permitiendo que el equipo sea versátil en su funcionamiento, empezando por el sistema de iluminación, comunicación bluetooth, sensor espectral, cargador de batería, raspberry pi3 y su visualizador gráfico.
- Se desarrolló el software amigable con el usuario, permitiendo la facilidad de uso y vacilación de datos, donde podrá escoger el tipo de trabajo que va realizar, adaptando el equipo para luz artificial y luz natural, donde se obtendrá un menú de opciones que pueda escoger fácilmente, al mismo tiempo podrá visualizar los datos obtenidos en la medición , ya que cuenta con almacenamiento de datos donde se podrá visualizar de manera gráfica y las firmas espectrales de cada muestra tomada para su posterior análisis.
- La implementación de carga de las baterías para el sistema, consta de una pantalla que indicara el porcentaje de la batería, el cual permitirá observar el tiempo de uso del equipo tiempo estimado 1 hora de trabajo continuo.

- Se diseñó e implemento una punta de muestra adaptable a la necesidad del equipo, de tal modo sea fácil de armar y desarmar de acuerdo al ambiente de trabajo, por su facilidad de traslado por el campo, además se implementó acoples desarmables para cada ambiente de trabajo, lo cual permite que una persona maneje fácilmente el equipo y tome muestras sin ningún problema.
- El envío de datos se realiza mediante bluetooth, la cual permita enlazar con varios equipos que este tipo de comunicación, con un alcance de 100 metros, el cual nos permitirá cubrir más terreno en la toma de datos.
- Las pruebas y calibración del equipo realizadas se observa que el software desarrollado proporciona graficas confiables en el rango que se trabaja, para lo cual se hizo una comparación de software con un comercial, cumpliendo los objetivos que fue diseñado y dando una similitud de datos entre el software diseñado y el comercial, donde se adjunta un certificado extendido por el INSTITUTO ESPACIAL ECUATORIANO el cual se encuentra en anexos.
- El equipo implementado se base en la aplicación de agricultura a precisión, donde se requiere obtener firmas espectrales, a través del índices de vegetación para lo cual nos basamos en un índice llamado PRI, el cual sirve para determinar la hidratación de la planta, siendo una equipo que facilite a los técnicos en este campo el análisis de cultivos o plantaciones.
- Una vez concluido el proyecto y realizar las diferentes pruebas con un espectroradiómetro comercial se concluyó que los datos obtenidos por el equipo

realizado, son datos válidos para su estudio y aplicabilidad está certificado por el INSTITUTO ESPACIAL ECUATORIANO.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar un vehículo aéreo no tripulado, con cual el equipo pueda cubrir más la extensión de trabajo, permitiendo desplazarse por toda el área de trabajo sin tener la necesidad de trasladarse tomar datos.
- Por la sensibilidad de la fibra óptica se recomienda que no se envuelva demasiado y mucho menos aplastarle, ya que el equipo quedaría obsoleto ya que es una base fundamental del prototipo.
- Comprobar que los conectores se encuentren bien conectados ya que puede haber la posibilidad que el equipo no encienda.
- Se recomienda que las baterías se carga mientras el equipo este apagado.
- Evitar que el sensor se encuentre destapado, ya que puede ingresar cualquier elemento extraño al sensor, por lo cual dañaría al mismo.
- Se recomienda que la calibración del sistema se realice con los accesorios del equipo, ya que puede variar la calibración con otro material regencia al blanco.

Bibliografía

(s.f.). Recuperado el 12 de Junio de 2018, de

http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/firma_es.htm

Alphaomega-electronics. (s.f.). Recuperado el 11 de ENERO de 2018, de Alphaomega-electronics:

<https://www.alphaomega-electronics.com/es/2720-sr-3500-espectrorradiometro-portatil-de-campo.html>

Apogee instruments. (s.f.). Recuperado el 12 de JUNIO de 2018, de Apogee instruments:

<https://www.apogeeinstruments.com/ss-110-field-spectroradiometer-340-to-820-nm/#product-tab-description>

aquateknica. (19 de 03 de 2017). Obtenido de aquateknica: <http://www.aquateknica.com/que-es-un-espectroradiometro-y-para-que-sirve-medicion-luz-baja-luminancia/>

CATALOGO DE SERVICIOS POST-VENTA. Calidad y servicio, nuestro compromiso. (s.f.). Recuperado el 14 de

JUNIO de 2018, de CATALOGO DE SERVICIOS POST-VENTA. Calidad y servicio, nuestro compromiso: <https://docplayer.es/19274998-Catalogo-de-servicios-post-venta-calidad-y-servicio-nuestro-compromiso.html>

Cruceira, R. C. (03 de 10 de 2017). *ingenierate*. Obtenido de ingenierate:

<https://ingenierate.com/2017/10/03/raspberry-pi-caracteristicas-aplicaciones/>

cybertesis. (19 de 03 de 2017). Obtenido de cybertesis:

<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2007/bmficio.98d/doc/bmficio.98d.pdf>

developer. (01 de 04 de 2018). Obtenido de developer:

<https://developer.android.com/studio/intro/?hl=es-419>

Fontal , B. (2005). *El Espectro Electromagnético y sus aplicaciones*. Merida: Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química.

Garis, D. S. (2010). Tratado de medicina física, Hidrología y climatología médica. En D. S. Garis, *Tratado de medicina física, Hidrología y climatología médica* (págs. 19-24). Estados Unidos: Hippocrates.

Guillermo, P. (2017). *espectroscopia.com*. Obtenido de *espectroscopia.com*:
https://www.espectrometria.com/espectro_electromagnetico

Helidroid. (01 de 07 de 2014). Obtenido de Helidroid: <http://www.helidroid.com.mx/agricultura-de-precision.php>

Hernández-Clemente, R. N.-C.-T. (2011). *Assessing structural effects on PRI for stress detection in conifer forests. Remote Sensing of Environment*.

idelsur. (s.f.). Recuperado el 2 de JULIO de 2018, de idelsur: <http://www.idelsur.com/?p=3680>

Lab-ferrer. (s.f.). Recuperado el 2 de AGOSTO de 2018, de Lab-ferrer.: <http://www.lab-ferrer.com/sensores/instrumentacion-y-sensores/teledeteccion-y-espectroradiometria/espectroradiometro-hiperespectral.html>

Mendoza Rodríguez, C. (12 de 2014). *El Radiómetro de Crookes*. Puebla.

Mera, R. J. (2014). *ANÁLISIS DE ESPECIES VEGETALES REPRESENTATIVAS DEL PÁRAMO DE*.

spectral evolution. (19 de 12 de 2018). Obtenido de *spectral evolution*:
<https://spectralevolution.com/accessories/pistol-grip/>

stellarnet. (s.f.). Recuperado el 3 de JUNIO de 2018, de *stellarnet*:
<http://www.stellarnet.us/spectrometers-accessories/fiber-optic-cables/>

ANEXOS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que presente trabajo fue realizado por los estudiantes; **Sr. Correa Bautista Edison Roberto** y el **Sr. Guanoluisa Betun Jhony Fernando**. En la ciudad de Latacunga a los veinte y un días del mes de enero del año dos mil diecinueve. Aprobado por:

Latacunga, 21 de enero del 2019

Ing. Andrea Córdova
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Vicente Hallo
DIRECTOR DE CARRERA



Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADÉMICO